

**AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND- UND  
KIEFERHEILKUNDE  
DES FACHBEREICHS MEDIZIN  
DER PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG**

Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. H. Korbmacher-Steiner

Abteilung für orofaziale Prothetik und Funktionslehre

Direktor: Prof. Dr. U. Lotzmann

in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,  
Standort Marburg

**Reduktion der Spannungsentwicklung von Kompositfüllungen  
durch neue Methoden der Steuerung der Lichtpolymerisation**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

Dem Fachbereich Medizin  
der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

**Malte Gustav Werner Kusch**  
aus Hildesheim

Marburg 2017

Angenommen vom Fachbereich Medizin der  
Philipps-Universität Marburg am: 01.12.2017

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Herr Prof. Dr. H. Schäfer

Referent: Herr Prof. Dr. M. Gente

1. Koreferent: Herr PD Dr. M. Roggendorf



Meiner Familie,  
meinen Freunden und Lehrern,  
sowie insbesondere  
meinem Doktorvater  
Prof. Dr. Michael Gente  
gewidmet.

## **Inhaltsverzeichnis**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Literaturbericht .....</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1 Lichthärtende Komposite.....  | 4         |
| 2.1.1 Zusammensetzung lichthärtender Komposite.....   | 4         |
| 2.1.2 Aushärtung von lichthärtenden Kompositen.....   | 6         |
| 2.1.3 Schrumpfungsbedingte Spannungen.....  | 8         |
| 2.1.4 Das Gradientenmodell.....   | 9         |
| 2.1.5 Photoinitiatorsysteme.....  | 12        |
| 2.2 Dentale Polymerisationslampen .....   | 16        |
| 2.3 Techniken zur Spannungsreduktion.....   | 20        |
| 2.3.1 Konventionelle Techniken zur Spannungsreduktion .....   | 20        |
| 2.3.2 Neue Ansätze zur Spannungsreduktion.....  | 22        |
| 2.4 Polarisiertes Licht .....   | 25        |
| <b>3 Material &amp; Methode .....</b>   | <b>27</b> |
| 3.1 Versuchsmaterialien.....  | 27        |
| 3.1.1 Prototyp einer Polymerisationslampe mit zwei Wellenlängen.....  | 28        |
| 3.1.2 Lichtempfindlichkeit von x-tra base .....   | 31        |
| 3.2 Spannungsmessung.....   | 33        |
| 3.2.1 Spannungsoptischer Versuchsaufbau .....   | 33        |
| 3.2.2 Modellkavitäten .....   | 35        |
| 3.2.3 Versuchsdurchführung und -dokumentation .....   | 36        |
| 3.2.4 Versuchsauswertung.....   | 37        |
| <b>4 Reduktion der Spannungsentwicklung von Kompositfüllungen durch neue Methoden der Steuerung der Lichtpolymerisation .....</b> | <b>40</b> |
| 4.1 Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe .....   | 40        |
| 4.2 Schichttechnik mit verschiedenen Geometrien .....   | 40        |
| 4.3 Vorversuche zur Ausgleichsschicht .....   | 42        |
| 4.4 Entwicklung der neuen Polymerisationslampe.....   | 44        |
| 4.5 Vorversuche zur Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung.....   | 44        |
| 4.6 Direktes Kompositinlay mit Ausgleichsschicht.....   | 47        |
| 4.7 Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung.....   | 49        |
| 4.8 Schichttechnik mit Vorhärtung .....   | 50        |
| <b>5 Ergebnisse.....</b>  | <b>51</b> |
| 5.1 Spannungen bei der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe.....   | 51        |
| 5.2 Spannungen bei der Schichttechnik verschiedener Geometrien.....   | 53        |
| 5.3 Spannungen beim direkten Kompositinlay mit Ausgleichsschicht .....  | 57        |
| 5.4 Spannungen bei der Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung .....   | 57        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.5       | Spannungen bei der Schichttechnik mit Vorhärtung.....                     | 58        |
| 5.6       | Zusammenfassung der Ergebnisse und statistische Auswertung.....           | 59        |
| <b>6</b>  | <b>Diskussion .....</b>   | <b>61</b> |
| 6.1       | Diskussion der Methoden .....   | 61        |
| 6.2       | Diskussion des untersuchten Bulk-Fill Komposits.....                      | 62        |
| 6.3       | Diskussion der technischen Entwicklung einer neuen Polymerisationslampe . | 64        |
| 6.4       | Diskussion der Vorgehensweise beim Mischen der Komposite .....            | 65        |
| 6.5       | Diskussion der Ergebnisse .....   | 67        |
| 6.5.1     | Diskussion der Bulk-Fill Technik .....                                    | 67        |
| 6.5.2     | Schichttechnik .....  | 69        |
| 6.5.3     | Anwendung einer Ausgleichsschicht .....                                   | 71        |
| 6.5.4     | Bulk-Technik mit Vorhärtung.....  | 73        |
| <b>7</b>  | <b>Zusammenfassung .....</b>  | <b>75</b> |
| 7.1       | Zusammenfassung (deutsch) .....   | 75        |
| 7.2       | Abstract (english).....   | 77        |
| <b>8</b>  | <b>Veröffentlichungen.....</b>  | <b>79</b> |
| <b>9</b>  | <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>80</b> |
| <b>10</b> | <b>Materialverzeichnis .....</b>  | <b>93</b> |
| <b>11</b> | <b>Verzeichnis der akademischen Lehrer .....</b>                          | <b>95</b> |
| <b>12</b> | <b>Danksagung .....</b>   | <b>96</b> |
| <b>13</b> | <b>Anhang.....</b>  | <b>97</b> |

## Abkürzungsverzeichnis

|          |  |
|----------|--|
| %        | Prozent  |
| Abb.     | Abbildung  |
| Bis-GMA  | Bisphenolglycidylmethacrylat                         |
| C-Faktor | Konfigurationsfaktor                                 |
| cm       | Centimeter   |
| CQ       | Campherchinon  |
| DIN      | Deutsches Institut für Normierung                    |
| E-Modul  | Elastizitätsmodul                                    |
| Gew.-%   | Gewichtsprozent/ Massenprozent                       |
| LED      | Englisch: light-emitting diode, deutsch: Leuchtdiode |
| mA       | Milliampere  |
| min      | Minuten  |
| mm       | Millimeter   |
| µm       | Mikrometer   |
| MPa      | Megapascal   |
| mV       | Millivolt  |
| mW       | Milliwatt  |
| nm       | Nanometer  |
| PC       | Personal Computer                                    |
| s        | Sekunden   |
| SDR®     | Smart Dentin Replacement                             |
| UDMA     | Urethandimethacrylat                                 |
| UV       | Ultraviolett   |
| V        | Volt   |

## 1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit

Ein kleiner Defekt im Zahn lässt sich heute problemlos durch moderne zahnfarbene Kompositmaterialien in Verbindung mit geeigneten Adhäsiv-Systemen versorgen.

Der Einsatz dieser Materialien ist jedoch stark durch die Größe des Defekts und der verbliebenen gesunden Zahnhartsubstanz limitiert. Das zu Grunde liegende Problem hierbei ist die Polymerisationsschrumpfung des Komposits. Ab einer gewissen Größe kann man solche Defekte deshalb nicht in einem Schritt mit Komposit füllen. Es werden dann konventionelle spannungsreduzierende Methoden, wie die Inkrementtechnik, angewendet oder die Kavität wird indirekt mit einem Inlay, einer Teilkrone oder einer Krone versorgt. Diese Maßnahmen bringen jedoch einen erheblichen zeitlichen Mehraufwand mit sich und folgen nicht mehr dem Prinzip der Minimalinvasivität.

Wie wäre es aber, wenn man einen Teil der größeren Defekte mit einer neuen Füllungsmethode versorgen könnte, bei der man ohne den zeitlichen Mehraufwand der Inkrementtechnik ähnlich effiziente Spannungsreduktionen erzielt? Und gibt es durch solche neuen Methoden auch die Möglichkeit, eine Art „direktes Komposit-Inlay“ in der Kavität herzustellen, bei dem man minimalinvasiv vorgehen und den kompletten Laboranteil einsparen kann?

Viele negative Eigenschaften der früheren Komposite, die sowohl deren Einsatzgebiet, als auch die Lebensdauer der Füllungen sehr einschränkten, wurden in den letzten Jahrzehnten durch intensive Forschung und Weiterentwicklung der Materialeigenschaften und Adhäsivsysteme erheblich verbessert [1, 2]. Jedoch besteht die entscheidende Herausforderung beim Legen einer solchen Füllung nach wie vor darin, einen dauerhaften adhäsiven Verbund zwischen Füllungskomposit und Zahn zu etablieren.

Wie bereits erwähnt, stellt die Polymerisationsschrumpfung der Komposite und die daraus resultierenden Kräfte auf den Haftverbund zwischen Zahn und Komposit immer noch das größte Problem für eine erfolgreiche Versorgung dar [3]. Diesbezüglich hat man über die Entwicklung vieler Generationen von Adhäsiv-Systemen versucht, die Adhäsionskräfte des Haftverbunds so zu erhöhen, dass sie die Schrumpfkkräfte des Komposits übersteigen. Wenn dem so ist, sind die durch die Schrumpfkkräfte entstehenden Probleme jedoch nicht behoben, sondern nur vom Haftverbund auf den Zahn übertragen. Im Zahn entstehen dadurch schrumpfkbedingte Spannungen

(Stress), welche wiederum zu Schmelzrissen, Höckerauslenkungen und Zahnfrakturen führen können [4, 5, 6, 7]. Um diese Problematik zu mindern, gibt es verschiedene chemische, physikalische aber auch mechanische Ansätze.

Diese Dissertation hat den Ansatz, durch eine neue Methode der Lichtpolymerisationssteuerung, die aus der Polymerisationsschrumpfung resultierenden Spannungen zu minimieren, ohne dabei den zeitlichen Aufwand für den Behandler zu erhöhen. Die grundlegende Idee dabei besteht in der Verwendung von zwei verschiedenen Photoinitiatorsystemen, die separat mittels einer speziellen Polymerisationslampe, deren Entwicklung auch Bestandteil dieser Arbeit sein soll, aktiviert werden können. Es wurden dazu zwei methodische Ansätze entwickelt.

Der erste Ansatz besteht darin, zuerst die Kavitätenwände dünn mit einem speziell angemischten Bulk-Fill-Flowable im Sinne einer Ausgleichsschicht zu beschicken, bevor man die restliche Kavität mit einem handelsüblichen Komposit auffüllt. Aufgrund einer speziellen Photoinitiatorzusammensetzung soll die Ausgleichsschicht durch blaues Licht lediglich einen Gelzustand erreichen und nur durch violettes Licht vollständig aushärtbar sein. Nach Aktivierung des Gelzustandes der Ausgleichsschicht darf sich diese möglichst nicht mehr von der Kavitätenoberfläche verdrängen lassen, damit der Kavitätenkern gefahrlos mit einem handelsüblichen Bulk-Fill-Flowable aufgefüllt und mit blauem Licht ausgehärtet werden kann. Die Ausgleichsschicht kann die hierbei auftretende Polymerisationsschrumpfung durch kriechen kompensieren. Abschließend ist es dann möglich, die Ausgleichsschicht mit violettem Licht vollständig auszuhärten.

Der zweite Ansatz basiert ebenfalls auf einer speziellen Photoinitiatorermischung im Komposit, die unter Anwendung der neuen Polymerisationslampe eine Aushärtung in zwei Phasen ermöglichen soll. Zwei Photoinitiatoren liegen dabei in verschiedenen Konzentrationen im Komposit vor. Die Konzentration des in der ersten Phase aktivierten Photoinitiators muss dabei so niedrig sein, dass zwar ein Übergangszustand erreicht wird, es durch jegliche Erhöhung der Energiedosis jedoch nicht zur vollständigen Aushärtung des Komposits kommen kann. Damit bestünde die Möglichkeit, das gesamte Komposit zuerst vollständig in einen noch kriechfähigen Gelzustand zu versetzen. In diesem Zustand können auftretende Schrumpfungen noch durch nachkriechen kompensiert werden. Die Konzentration des in der zweiten Phase aktivierten

Photoinitiators muss allerdings eine vollständige Aushärtung des Komposits sicher gewährleisten.

In dieser Arbeit soll ermittelt werden, ob durch die beiden oben beschriebenen neuen Methoden eine signifikante, reproduzierbare Spannungsminimierung gegenüber der Bulk-Technik und der konventionellen Schichttechnik erreicht werden kann. Außerdem soll der für diese Methoden notwendige Prototyp einer Aushärtungslampe entwickelt werden, die mit zwei LEDs unterschiedlicher Wellenlänge arbeitet. Demnach beschäftigt sich diese Studie auch mit der technischen Umsetzung der Methoden. Als Messmethode kam eine Weiterentwicklung der etablierten spannungsoptischen Messmethode zur Ermittlung der Schrumpfungsspannungen zum Einsatz.

## 2 Literaturbericht

Im Folgenden soll die relevante Literatur aufgezeigt werden. Dabei wird zu Beginn auf einige Grundlagen der lichthärtenden Komposite eingegangen. Im Anschluss werden die aktuellen Techniken dentaler Polymerisationslampen näher betrachtet. Des Weiteren wird die Polymerisationsschrumpfung und die dadurch hervorgerufenen schrumpfungsbedingten Spannungen, sowie Techniken zur Reduktion dieser Spannungen beschrieben. Abschließend wird auf das bei der spannungsoptischen Messmethode eingesetzte polarisierte Licht eingegangen. Die Messmethode wird im Kapitel 3.2 ausführlich erläutert. Wegen des enormen Umfangs der Literatur, wird ausschließlich auf die Literaturstellen eingegangen, welche für die geplanten Untersuchungen besonders relevant erscheinen.

### 2.1 Lichthärtende Komposite

Komposite sind zahnfarbene plastische Zahnfüllungswerkstoffe. Die Verwendung von Kompositen zur Füllung von Kavitäten gilt heutzutage als Standardtherapie in der Zahnmedizin [14]. Die drei Hauptbestandteile der Komposite bilden die organische Kunststoffmatrix, die anorganische disperse Phase mit Füllkörpern und die Verbundphase. Die anorganischen Füllkörper mit silikatischer Oberfläche werden über die Verbundphase (Silane) chemisch mit der organischen Kunststoffmatrix verbunden.

#### 2.1.1 Zusammensetzung lichthärtender Komposite

Im nicht ausgehärteten Zustand besteht die organische Harzmatrix aus Monomeren, Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffen, Pigmenten und anderen Additiva.

Die Monomere sind nahezu ausschließlich mehrfunktionelle Methacrylate. Sie liegen in der Regel als Gemisch mehrerer Monomere vor, die nach der Formel MA - R - MA als Dimethacrylate aufgebaut sind. Hauptbestandteil ist meistens das von Bowen 1962



eingeführte Bis-GMA (Bisphenolglycidylmethacrylat) [15], das hochviskös ist und sehr wenig Polymerisationsschrumpfung aufweist. Durch das Mischen mit Verdünnernomeren wie z.B. TEGDMA (Triethylenglykol-dimethacrylat), UDMA (Uret-handimethacrylat) oder Bis-EMA (Bisphenol-A ethoxyliertes Dimethacrylat), wird auf Kosten einer etwas höheren Polymerisationsschrumpfung die Viskosität des Komposits leicht herabgesetzt [16].

Die verwendeten Photoinitiatoren sind z.B. Kampferchinon, Lucirin® TPO, Phenyl-Propandiol oder Acylgermanium-Verbindungen. Als Reduktionsagent dient in der Regel ein tertiäres aliphatisches Amin [17], wie Dimethylaminoethanol oder Ethyl-4-(Dimethylamino)benzoat (4-(N,N-dimethylamino)-benzoic-acid-ethyl-ester oder DMABEE). Stabilisatoren wie Benzophenon oder 2-Hydroxy-4-Methoxybenzophenon beugen hingegen einer vorzeitigen Aushärtung des Materials durch UV-Licht vor.

Als Farbpigmente kommen heutzutage meist Eisenoxide zum Einsatz. Außerdem enthält die organische Matrix Akzeleratoren (z.B. Toluidin) und Inhibitoren (z.B. Hydrochinon, Hydrochinonmonomethylether oder butyliertes Hydroxytoluol) der Polymerisation, sowie Nanopartikel, die zur Verbesserung der Biegefestigkeit beitragen.

Die anorganischen Füllkörper der dispersen Phase können Glas-, Glaskeramik-, Silikat- oder Siliziumdioxidpartikel sein. In der Regel handelt es sich um kristallines Quarz und Gläser wie Barium-Aluminium-Silikate. Sie werden hinzugefügt, um die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Füllungsmaterials zu verbessern [18]. Je nach Komposittyp weisen diese sehr unterschiedliche Partikelgrößen auf, die maßgeblich das klinische Verhalten beeinflussen. Man unterscheidet dabei Makro-, Mikro- und Hybridkomposite. Der Fülleranteil lässt sich je nach Typ und Kombination von Füllern bis auf 85% erhöhen [16], wobei die mittlere Partikelgröße meist bis zu 10µm beträgt. Die anorganischen Füllkörper sind außerdem im Wesentlichen für die Härte und mechanische Festigkeit des Komposits verantwortlich. Erhöht man ihren Anteil, verringert sie die Polymerisationsschrumpfung, im Gegenzug wird jedoch das E-Modul erhöht und umgekehrt [19, 20].

Die Verbundphase ist entscheidend für die Einbindung der Füllkörper in die Matrix. Die Füllerpartikel weisen eine hydrophile Oberfläche auf, da der Hauptbestandteil meist SiO<sub>2</sub>-Moleküle sind. Kunststoffe wie Bis-GMA sind jedoch hydrophob, weshalb die SiOH-Oberflächen ohne Silanisierung nicht ausreichend von den Bis-GMA-

Moleküle benetzt werden würden. Dieses Problem wird durch die Verbundphase gelöst, die meistens aus hydrolisierten Silanen (Silan = Kunstwort aus Silikon und Methan) wie  $\alpha$ -Methacryloxy-propyl-trimethoxy-silanol (MPS) besteht. Wenn die Glaspartikel mit MPS behandelt werden, wird deren hydrophile Si-OH-Oberfläche hydrophob und kann sich mit der organischen Kunststoffmatrix verbinden. Durch diese Silanisierung der Glaspartikel kann deren Oberfläche erheblich besser von der Kunststoffmatrix benetzt und somit die mechanische Retention zwischen Füller und Kunststoff gesteigert werden. Diese Einbindung des Füllstoffs in die Matrix wirkt sich auch auf die mechanischen Eigenschaften des Komposits aus. Die Biegefestigkeit, Druckfestigkeit und Vickershärte werden deutlich erhöht [16]. Es kann darüber hinaus auch zu chemischen Bindungen zwischen den Füllern und dem Kunststoff kommen, indem zwischen den beiden Silanolgruppen des Silans und der Glasoberfläche eine Kondensationsreaktion stattfindet. Bei der Aushärtung des Matrixmaterials gehen die endständigen Methacrylatgruppen des MPS-Moleküls dann eine kovalente Bindung mit dem Kunststoff ein [21].

### 2.1.2 Aushärtung von lichthärtenden Kompositen

Bei der dentalen Füllungstherapie kommen aufgrund ihres breiten Anwendungsspektrums, der Schonung und adhäsiven Stabilisierung der Zahnhartsubstanz und der, im Vergleich zu indirekten Restaurationen, preiswerteren und weniger zeitaufwendigen Versorgung, heute vor allem lichthärtende Komposite zum Einsatz [3]. Sie enthalten mindestens einen Photoinitiator, wobei das Kampferchinon den meist verwendeten Initiator darstellt. Bei einigen Initiatoren, wie auch bei Kampferchinon, lässt sich die Effizienz durch einen Ko-Initiator verbessern [23]. Je nach Photoinitiator startet der Polymerisationsprozess der organischen Kunststoffmatrix bei Bestrahlung mit blauem, violetter oder ultravioletter Licht und startet den Aushärtungsprozess des Komposits. Dabei absorbiert der Initiator das eingestrahlte Licht und zerfällt in Radikale. Diese lösen dann den chemischen Prozess der radikalischen Photopolymerisation des Harzes im Komposit aus, indem sie die Doppelbindungen der einzelnen Harzmonomere wie z.B. Bis-GMA oder TEGDMA aufspalten. Es bilden sich dann Bindungen zwischen den

Molekülen aus, wodurch Molekülketten verschiedener Länge entstehen und das Komposit nach und nach fest wird. Die Reaktion bricht ab, wenn die Enden zweier Molekülketten miteinander oder eine Molekülkette mit einem Radikal bzw. einem Stabilisator reagiert.

Man kann die Polymerisationsreaktion dabei in drei Phasen unterteilen. Zuerst werden bei Belichtungsbeginn die Stabilisatoren aufgebraucht, die ein ungewolltes vorzeitiges Aushärten verhindern. Danach beginnt mit der Pre-Gel-Phase die erste Polymerisationsphase. Hier ist die Konsistenz des Komposits noch fließfähig, es bilden sich aber bereits erste Molekülketten. Bei der Ausbildung der Molekülketten reduziert sich der Abstand zwischen den gebundenen Harzmolekülen im Vergleich zum Abstand einzelner Harzmoleküle im plastischen Zustand, da die Kettenformation energetisch günstiger ist. Die Monomere können sich in dieser Phase aber noch innerhalb der Matrix bewegen, weshalb zu diesem Zeitpunkt keine relevanten Schrumpfungen entstehen. Bei fortschreitender Polymerisation wird die Gel-Phase bzw. der Gelpunkt erreicht, an dem sich bereits so viele Monomere als Makromoleküle verbunden haben, dass die Bewegung der restlichen Monomere innerhalb der Matrix gehemmt wird. Ein Ausgleich der bereits erfolgten Polymerisationsschrumpfung innerhalb der Kompositmatrix ist ab hier nicht mehr möglich. Alle ab diesem Punkt entstehenden Schrumpfungen bzw. minimalen Abstandsverringerungen ergeben in der Addition ein verringertes Gesamtvolumen des erhärteten Komposits, verglichen mit dem vorher fließfähigen Volumen. Sie stellen somit die relevanten Spannungen dar, die sich auf den adhäsiven Verbund zwischen Zahn und Komposit auswirken [15, 50]. Das bedeutet, je größer der Anteil niedermolekularer, kurzkettiger und reaktiver Monomere in der Kunststoffmatrix ist, desto größer ist aufgrund des steigenden Konversionsgrades die Polymerisationsschrumpfung. Sie beträgt je nach Molekülstruktur der Monomere, Fülleranteil [48, 49] und Doppelbindungsumsatz [49,59] 1-5% [46, 47].

### 2.1.3 Schrumpfungsbedingte Spannungen

Die Polymerisationsschrumpfung an sich stellt nicht die eigentliche klinische Relevanz dar, ist jedoch die Ursache für das Auftreten schrumpfungsbedingter Spannungen. Wenn man nämlich in der klinischen Situation ein Komposit in eine Zahnkavität einklebt, werden beim Aushärten des Komposits polymerisationsbedingte Schrumpfkraften auf den adhäsiven Verbund bzw. über den adhäsiven Verbund auf den Zahn übertragen. Deren Größe wiederum hängt vor allem von der Polymerisationsschrumpfung und dem Elastizitätsmodul des Komposits ab. Daher multiplizieren *Rullmann et al.* (2012) das E-Modul mit dem Betrag des Volumenschrumpfes und definieren das Produkt als Polymerisationsschrumpfkraft [51]. Diese wird in MPa bzw. N/mm<sup>2</sup> angegeben. Zusätzlich folgt aus einem erhöhten Doppelbindungsumsatz generell eine größere Schrumpfung und ein höheres E-Modul, wodurch letztendlich höhere Spannungswerte am adhäsiven Verbund erzeugt werden [49, 60].

Wenn die Haftkraft des Adhäsivsystems größer als die Polymerisationsschrumpfkraft ist, wird der Stress dauerhaft auf den Klebeverbund bzw. auf den Zahn übertragen. Es entstehen Zug- und Scherspannungen im Zahn, die zu einer Deformation der Kavitätenwände und damit einhergehend zu einer Verringerung des Kavitätenvolumens führen [52, 53]. Hält der adhäsive Haftverbund der Polymerisationsschrumpfkraft jedoch nicht stand, löst sich das Komposit vom Zahn ab und es können Randverfärbungen und postoperative Hypersensitivitäten auftreten [54]. Des Weiteren kann es zur Ausbildung von Rissen und Spalten zwischen Zahn und Komposit kommen. Diese sogenannte Randspaltbildung und die Mikroleakage (Penetration von Bakterien oder Farbstoffen) mit Sekundärkariesentstehung bilden die Hauptursachen des Scheiterns adhäsiv verlegter Füllungsmaterialien [55]. Es ist also von entscheidender Bedeutung, die Entstehung solcher Randspalten nach Möglichkeit zu vermeiden. Dazu muss die Klebekraft des adhäsiven Haftverbundes immer größer sein, als die auftretenden Schrumpfkraften. Zu diesem Zweck gibt es zwei verschiedene Ansätze. Der eine besteht darin, die Klebekraft des Adhäsivsystems weiter zu steigern. Bei dem anderen Ansatz versucht man, die Polymerisationsschrumpfkraften zu verringern. Dazu gibt es wiederum verschiedenste methodische, mechanische und chemische Ansätze, die verschiedene Parameter, wie z.B. die Polymerisationsschrumpfung oder das

E-Modul beeinflussen. Neben den Compositeigenschaften werden die Kavitätengeometrie (Volumen und C-Faktor), sowie die Applikations- und die Polymerisationsmethode als mögliche Einflussfaktoren diskutiert [56, 57, 58].

#### 2.1.4 Das Gradientenmodell

Die Composite nach neuestem Stand der Technik härten bei korrekter Belichtung von der zur Polymerisationslampe zugewandten Oberfläche her aus [123]. Dabei kann die fließfähige Phase, je nach Lichteinfall, Kontraktionen der Gelphase kompensieren. Der Intensitätsabfall des Lichts innerhalb der Kompositfüllung muss dazu jedoch so groß sein, dass die Lichtdosis an der lichtabgewandten Seite der Kompositfüllung nicht zur Ausbildung der Gelphase reicht [44].

Das von *Sommer und Gente* (1999) entwickelte Gradientenmodell beschreibt, wie man durch eine Änderung der Bestrahlungsrichtung die Polymerisationsschrumpfrichtung steuern kann [44]. Dabei ist die absolute Volumenschrumpfung so lange unabhängig von der Bestrahlungsrichtung, wie die Dicke des Komposits eine direkte vollständige Aushärtung ermöglicht. Wenn jedoch die Materialdicke oder die Opazität des Materials so groß ist, dass die Lichtintensität  $I$  in tieferen Kompositsschichten deutlich abnimmt, sollte der Abfall der Intensität  $I$  der Gleichung des Lambert-Beer-Gesetzes folgen:

$$I = I_0 e^{-\lambda \Delta x}$$

Dabei beschreibt  $I_0$  die Intensität des Bestrahlungslichts beim Eintreffen auf das Material.  $\lambda$  ist der Absorptionskoeffizient des Materials und  $\Delta x$  die Dicke der Materialprobe. Um eine Kompositprobe der Dicke  $\Delta x_0$  vollständig zu polymerisieren, benötigt man eine gewisse Lichtdosis  $D$ , die als Produkt der oben genannten Lichtintensität  $I$  und der Bestrahlungsdauer  $\Delta t$  definiert ist:

$$D = I \Delta t$$

Wenn man daraus folgend eine Kompositprobe der Dicke  $\Delta x > \Delta x_0$  mit einer bestimmten Lichtdosis  $D$  bestrahlt, härtet nicht die komplette Probe zeitgleich aus. Zuerst wird lediglich die dem Licht zugewandte Schicht der Dicke  $\Delta x_1$  fest. In der folgenden Zeit bilden sich dann an der lichtabgewandten Seite dieser Schicht drei verschiedene Phasenebenen aus, die sich in unterschiedlichen Zuständen befinden und fließend ineinander übergehend senkrecht zur Lichteinfallsrichtung liegen. Der bereits vollständig polymerisierten Schicht  $\Delta x_1$  liegt lichtabgewandt eine gelartige Zwischenphase  $\Delta x_2$  an, die zwar noch nicht ausgehärtet, aber auch nicht mehr fließfähig ist. Darunter liegt wiederum die noch fließfähige Phase  $\Delta x_3$ . Die Gesamtdicke  $\Delta x$  der Kompositprobe ergibt sich aus der Addition der drei Phasen  $\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 = \Delta x$ . Abb. 2.1.3-1 zeigt die schematische Darstellung dieses Gradientenmodells nach Nötzel (2008) [109].

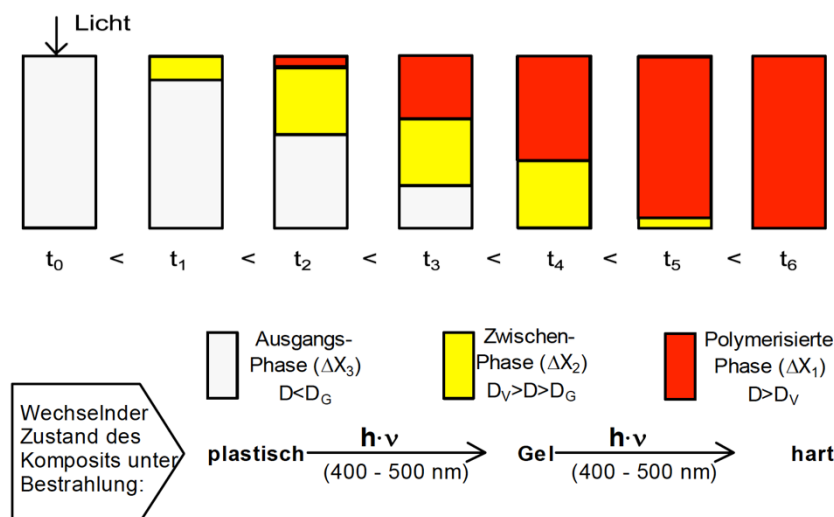


Abb. 2.1.4-1: Schematische Darstellung des Gradientenmodells (aus Dissertation Nötzel, 2008 [109])

Sommer und Gente testeten den Einfluss der Bestrahlungsrichtung mit einem speziell entwickelten Dilatometer, in dem eine Kompositprobe zwischen einer Glasplatte und einem an einer Messuhr befestigten Glasstreifen eingebracht, von verschiedenen Richtungen ausgehärtet und die Schrumpfung abgelesen werden konnte. Bestrahlt man dabei die Kompositprobe ab Zeit  $t_0$  parallel zur Messeinrichtung mit der Lichtdosis  $D$ , wird so lange kein Schrumpf an der Messuhr sichtbar, wie die fließfähige Phase  $\Delta x_3$  existiert, da sie den Schrumpf der Phasen  $\Delta x_1$  und  $\Delta x_2$  durch nachfließendes Komposit ausgleicht (bis einschließlich  $t_3$ ). Erst beim Gelieren der Phase  $\Delta x_3$  (ab  $t_4$ ) kann ein Schrumpf gemessen werden, wobei der größte Schrumpfanteil in der Gelphase  $\Delta x_2$  des

Komposits entsteht. Bei senkrechter Belichtung zur Messeinrichtung kann jedoch sofort ein Schrumpf gemessen werden, da sich unverzüglich eine polymerisierte Brücke zwischen Glasplatte und Glasstreifen bildet.

Die lineare Schrumpfungsreduktion war außerdem von der Opazität des Komposits abhängig. Dabei gilt, je opaker das Material, desto größer der Intensitätsabfall des Lichts und desto dicker somit auch die Phase  $\Delta x_3$ . Des Weiteren stellten *Sommer und Gente* fest, dass der lineare Schrumpf bei paralleler Belichtung zur Messeinrichtung unter der Bedingung  $\Delta x_{(\text{Probendicke})} > \Delta x_2 (\text{Gelphase})$  unabhängig von der Probendicke war. Sie stellten dadurch die Vermutung auf, dass die verwendeten Komposite „im untersuchten Bereich den Charakter einer von der Probendicke unabhängigen Materialkonstanten“ hatten [44].

*Dudda* (2014) erweiterte das Gradientenmodell um eine vierte Phase. Sie entdeckte zwischen der Ausgangsphase, in der noch kein Schrumpf messbar ist und dem Gelzustand (Zwischenphase), in dem bereits ein Schrumpf gemessen werden kann, noch eine weitere Phase, die sogenannte Übergangsphase. Sie beschreibt, dass „in diesem Zustand schon deutliche Teile der Schrumpfung erfolgt“ seien, die „durch nachkriechendes und nachfolgend eingefülltes Material kompensiert werden konnten“ [45]. Das Komposit ist in dieser Übergangsphase nicht mehr fließfähig oder modellierbar, aber innerhalb einiger Mikrometer kriechfähig und kann somit auftretende Schrumpfungen teilweise kompensieren.

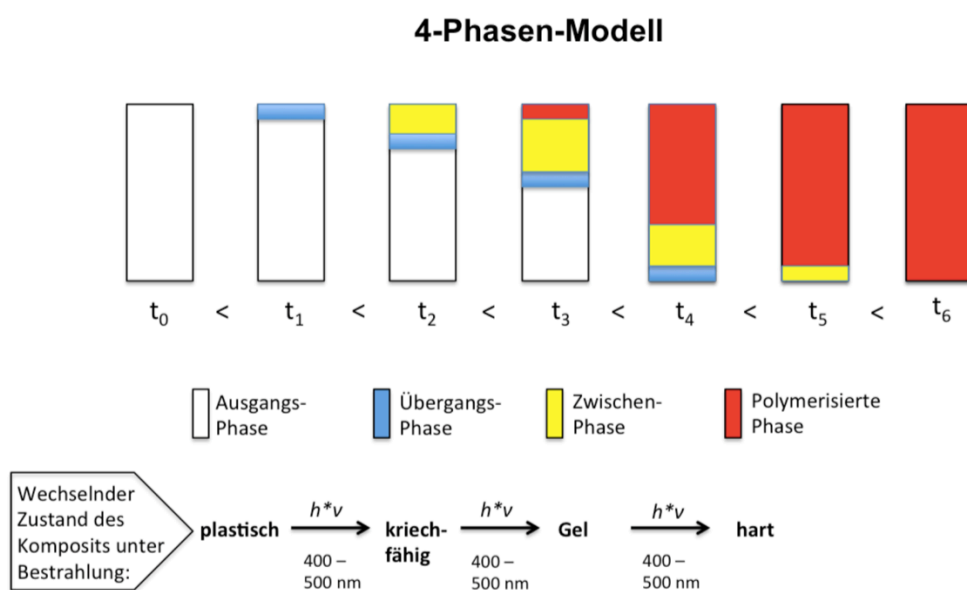


Abb. 2.1.4-2: Schematische Darstellung des 4-Phasen-Modells (aus Dissertation Dudda, 2014 [45])

### 2.1.5 Photoinitiatorsysteme

Generell wird bei Kompositen zwischen UV-Lichthärtenden und Halogenlichthärtenden Materialien unterschieden [16]. Es werden heutzutage jedoch meistens Halogenlichthärtende Materialien verwendet [16], da UV-Licht nur eine geringe Tiefenpolymerisation erlaubt [22]. Manche Hersteller verwenden innerhalb dieses Lichtspektrums Komposite mit einer Kombination mehrerer Photoinitiatoren [24].

Die verschiedenen Photoinitiatoren absorbieren jeweils Photonen eines bestimmten Wellenlängenbereichs, wobei jeder Photoinitiator ein charakteristisches Absorptionsspektrum aufweist. Der angeregte Initiator reagiert mit dem Reduktionsagens, (aliphatisches Amin) wodurch ein angeregter Komplex entsteht. Der Komplex zerfällt dann in Radikale und startet die radikale Photopolymerisation. Die Menge des Photoinitiators im Komposit ist vom jeweiligen Initiator und der Verwendung eines Ko-Initiators abhängig. Bei dem am häufigsten verwendeten Photoinitiator Kampherchinon und dem dazugehörigen tertiären Amin beträgt der Anteil in der Monomermatrix 0,1 Gew.-% - 0,4 Gew.-% [16].

*Shintani et al.* berichteten bereits 1985, dass die Menge des Kampherchinons je nach Hersteller und Menge des Füllstoffgehaltes variiert. Dabei wiesen Komposite mit mehr anorganischen Füllkörpern auch höhere Kampherchinon-Konzentrationen auf und umgekehrt [25].

*Guimarães et al.* (2014) konnten unterhalb einer Initiatorkonzentration von 1,5 Gew.-% einen positiven Zusammenhang zwischen der Konzentration, dem Doppelbindungsumsatz und den mechanischen Eigenschaften ermitteln. Oberhalb von 1,5 Gew.-% konnten sie keine Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften feststellen [26].

Als meist verwendeter Photoinitiator absorbiert das alpha-Diketon Kampherchinon Licht im Bereich von 370 nm – 500 nm mit einem Absorptionsmaximum bei 468 nm [39] (siehe Abb. 2.3.1-1).

Ein anderer häufig verwendeter Photoinitiator trägt den Handelsnamen *Lucirin® TPO* und gehört zu den Acylphosphinoxiden. Im Vergleich zum gelblichen Campherchinon bleicht dieser Photoinitiator nach dem Aushärten vollständig aus. Deshalb wird er unter anderem in Bleachingkompositen verwendet [28].



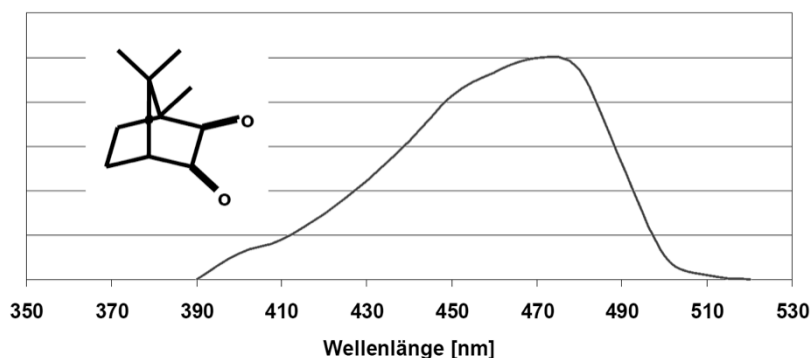


Abb. 2.1.5-1: Absorptionsspektrum von Kampferchinon

(aus Völkel, T.: wissenschaftliche Dokumentation bluephase® Familie, 2009 [24])

Einige Hersteller kombinieren Kampferchinon und *Lucirin® TPO* miteinander und fügen teilweise noch weitere Initiatoren hinzu [24, 28, 29]. *Lucirin® TPO* absorbiert im Bereich von 350 nm – 430 nm (siehe Abb. 2.3.1-2).

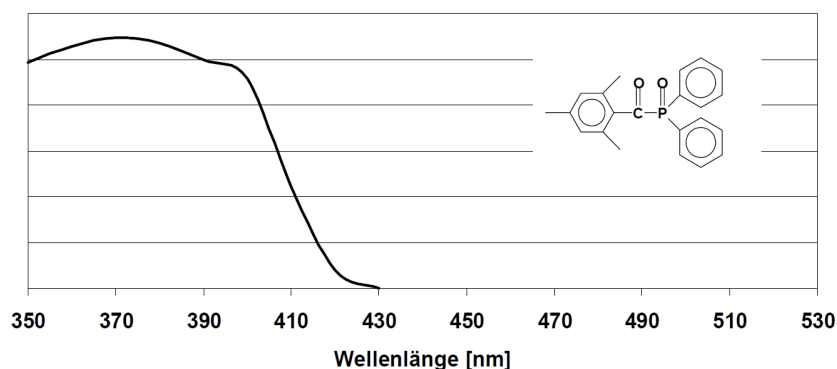


Abb. 2.1.5-2: Absorptionsspektrum von Lucirin® TPO

(aus Völkel, T.: wissenschaftliche Dokumentation bluephase® Familie, 2009 [24])

Im Gegensatz zu herkömmlichen Halogenlampen lässt es sich daher mit LED-Lampen der ersten beiden Generationen nur unzureichend aktivieren, da deren emittierter Spektralbereich kaum das Absorptionsspektrum von *Lucirin® TPO* tangiert (siehe Abb. 2.3.1-3). Erst durch LED-Lampen der neuesten Generation mit sogenannten *polywave®* LEDs ist es möglich, *Lucirin® TPO* auch mit LED-Geräten ausreichend zu aktivieren. Durch deren breites Emissionsspektrum lassen sich Composite mit allen auf dem Markt verwendeten Photoinitiatorsystemen aushärten.

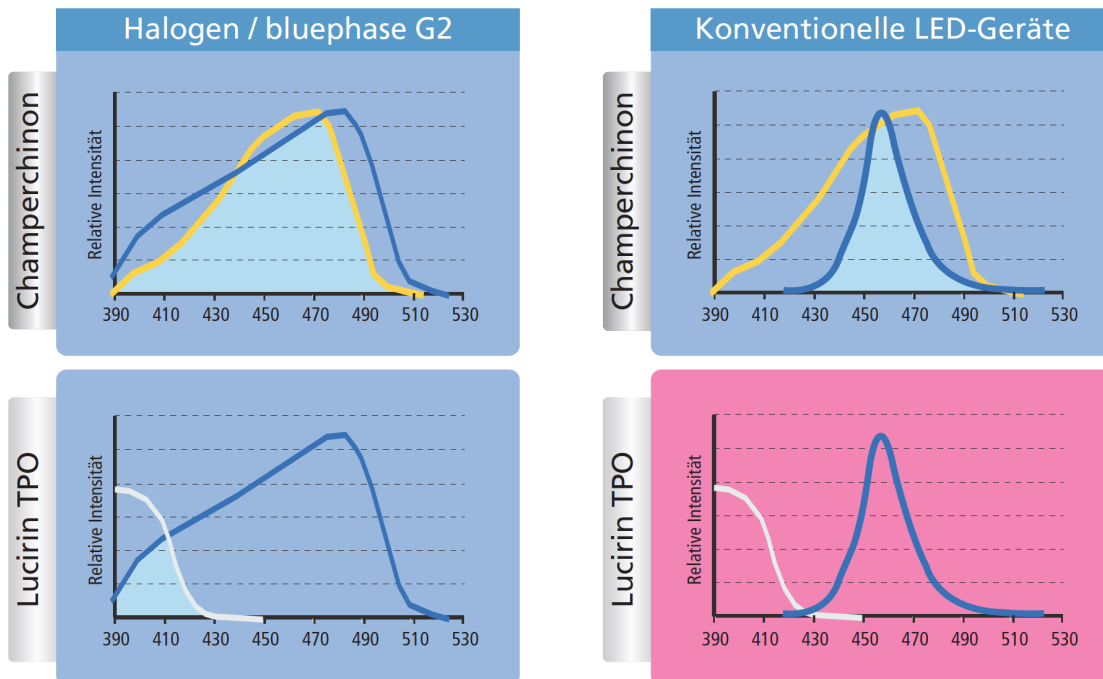


Abb. 2.1.5-3: Absorptionsspektren von Lucirin® TPO und Kampherchinon im Vergleich zu den Emissionsspektren verschiedener Polymerisationslampen.  
(aus Völkel, T.: wissenschaftliche Dokumentation bluephase® Familie, 2009 [24])

Das Absorptionsspektrum des farblosen Photoinitiators 1-Phenyl-1,2-Propandion (PPD) liegt mit 360 nm – 520 nm in einem sehr ähnlichen Bereich wie Kampherchinon. Das Absorptionsmaximum ist allerdings in kürzere Wellenlängenbereiche bei 398 nm [23] verschoben. PPD wurde als Alternative zu Kampherchinon vorgeschlagen, um die Polymerisationskinetik zu verbessern, ohne dabei eine gelbe Eigenfarbe zu besitzen [30]. *Park et al.* (1999) fanden heraus, dass es bei Kombination von PPD mit Kampherchinon zu einer Verstärkung der photosensiblen Wirkung kommt und die Konversionsrate im Komposit erhöht wird. Sie konnten die besten Umsatzraten beim Verhältnis von PPD zu Kampherchinon zwischen 1:1 und 1:4 erzielen [30]. *Brandt et al.* (2010) konnten zwar nachweisen, dass PPD bei Aushärtung mit LED-Lampen das Potential als effektiver Photoinitiator und ähnliche Umsatzraten wie Kampherchinon besitzt. Die Kombination von Kampherchinon und PPD erzielte in ihrer Studie aber keine besseren Umsatzraten. Sie führen diesen Gegensatz auf die deutlich niedrigere Initiorkonzentration in ihrer Studie (0,4 Gew.%) gegenüber der von *Park et al.* (1,8 Gew.%) zurück. Außerdem benutzten *Park et al.* konventionelle Halogenlampen und einen reaktionsfreudigeren Koinitiator, wodurch die Photonenenergie besser ge-

nutzt werden konnte [23].

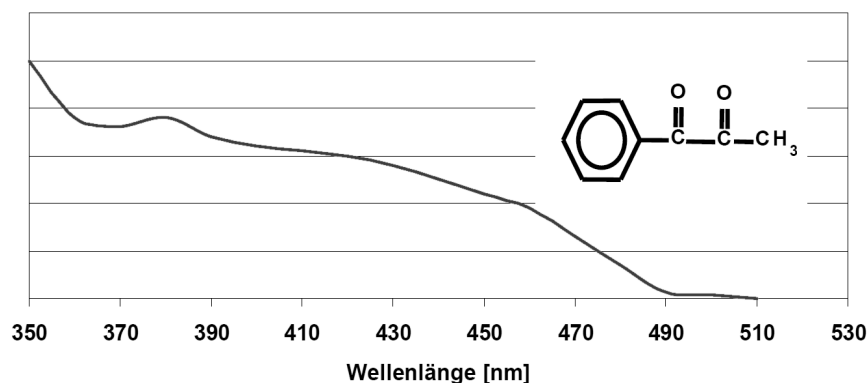


Abb. 2.1.5-4: Absorptionsspektrum von PPD

(aus Völkel, T.: wissenschaftliche Dokumentation bluephase® Familie, 2009 [24])

Neuartige Photoinitiatoren basieren auf organischen Germaniumverbindungen wie Benzoyltrimethylgermanium (Ge-1) und Dibenzoyldiethylgermanium (Ge-2). Deren Absorptionsmaxima liegen bei 411 nm (Ge-1) bzw. 418 nm (Ge-2) [31].

Der Photoinitiator *Ivocerin*® (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) enthält Bis-4-(methoxybenzoyl)diethylgermanium (Ge-3). Sein Absorptionsmaximum liegt bei 408 nm. Seine Quantenausbeute wird mit 0,85 [32] deutlich höher angegeben, als beim Kampferchinon mit ca. 0,07 [33]. Des Weiteren konnte, ähnlich wie beim *Lucirin*® TPO, eine schnelle Entfärbung bei Bestrahlung mit Licht und eine hohe Lagerungsstabilität bei Raumtemperatur festgestellt werden [31]. Außerdem wurden höhere Doppelbindungsumsätze im Vergleich zu Kampferchinon erzielt und die Durchhärtungstiefen ließen sich durch eine Kombination von Kampferchinon und Ivocerin signifikant verbessern [34].

## 2.2 Dentale Polymerisationslampen

Das menschliche Auge kann Licht im Spektralbereich von ca. 380 nm – 750 nm wahrnehmen. Die Absorptionsspektren der im letzten Kapitel erläuterten Photoinitiatoren liegen jedoch nur im Bereich von ca. 380 nm – 520 nm. Deshalb sind für deren Lichtpolymerisation lediglich blaue und angrenzende violette Lichtbereiche relevant [27].

Zur Lichtgenerierung stehen auf dem Markt verschiedene Techniken zur Verfügung. Es gibt die konventionellen Halogenlampen, Plasmalampen, Laser, konventionelle blaue LED-Lampen der ersten und zweiten Generation und breitbandige LED-Lampen der dritten Generation. Neben dem Emissionsspektrum spielt die Leistungsstärke eine entscheidende Rolle. Die optimale Mindeststärke einer Polymerisationslampe sollte  $800 \text{ mW/cm}^2$  betragen [27]. *Ernst et al.* (2006) untersuchten im Jahr 2005 die Lichtemissionsleistung von 659 Lichtpolymerisationsgeräten in 301 zahnärztlichen Praxen im Rhein-Main-Gebiet mit einer Ulbrichtkugel. 7 % der Geräte wiesen dabei eine zur Lichtpolymerisation ungeeignete Leistung von  $< 200 \text{ mW/cm}^2$  auf, 26 % eine Leistung von  $< 400 \text{ mW/cm}^2$  [35]. Da heute fast ausschließlich Halogen- und LED-Lampen zur Lichtpolymerisation dentaler Komposite verwendet werden, soll hier auf die Plasmalampen und Laser nicht näher eingegangen werden.

Halogenlichtpolymerisationsgeräte funktionieren im Prinzip wie normale Glühlampen, bei denen ein Wolframdraht in einem mit dem Edelgas Halogen gefüllten Quarzglasleuchtkörper zum Glühen gebracht wird und weißes Licht erzeugt. Sie verfügen außerdem über einen Reflektor und einen Blaufilter, der das emittierte Licht auf den für die gängigen Photoinitiatoren nutzbaren Lichtanteil von ca. 370 nm – 550 nm einschränkt [36]. Nachteil des breiten Emissionsspektrums ist, dass der zur Lichtpolymerisation verfügbare Energieanteil nur ca. 0,7 % beträgt [27].

Die Betriebstemperatur und damit auch die Helligkeit ist bei dentalen Halogenlampen deutlich höher, als bei normalen Glühlampen. Durch diese beträchtliche Wärmemenge während der Betriebszyklen altern die Glühlampe, der Reflektor und der Filter relativ schnell, weshalb sich ihre Lebenszeit auf ca. 100 Stunden verkürzt [37]. Des Weiteren führt die Alterung der genannten Komponenten dazu, dass die Aushärtungseffizienz der Lampen über den gesamten Lebenszyklus hinweg stark abnimmt und teilweise unter die von den Kompositherstellern geforderte Mindestleistung absinkt [38]. Eine

weitaus effizientere Alternative stellen die im Jahr 2001 eingeführten LED-Lampen dar. Sie haben heutzutage die über Jahre dominierenden Halogenlampen als Standard in der Lichtpolymerisationstechnik abgelöst [40] und verfügen mit 7 – 15 % über einen 10-mal höheren Wirkungsgrad als vergleichbare Halogenlichtgeräte [27]. Ein weiterer entscheidender Vorteil gegenüber den Halogenlampen ist die Lebensdauer der LEDs. Sie beträgt mehrere tausend Stunden, ohne dabei einen signifikanten Intensitätsverlust zu verzeichnen. Die sogenannten solid-state LEDs nutzen zur Lichterzeugung p-n-Übergänge. Bei GaN-basierten LEDs rekombinieren unter Vorspannung Elektronen und Löcher am p-n-Übergang der LEDs, wodurch blaues Licht erzeugt wird. Teilweise wird das so erzeugte Licht noch durch eine Polymerlinse vor dem p-n-Übergang gebündelt. Die konventionellen blauen LEDs emittieren Licht im Bereich von 450 nm - 490 nm. Damit sind sie optimal auf den Photoinitiator Kampferchinon mit seinem Absorptionsmaximum bei 468 nm abgestimmt und benötigen keine Blaufilter, wie die Halogenlampen. Die Eingrenzung bedingt jedoch, dass manche andere Photoinitiatoren, wie z.B. *Lucirin® TPO*, nicht ausreichend aktiviert werden können.

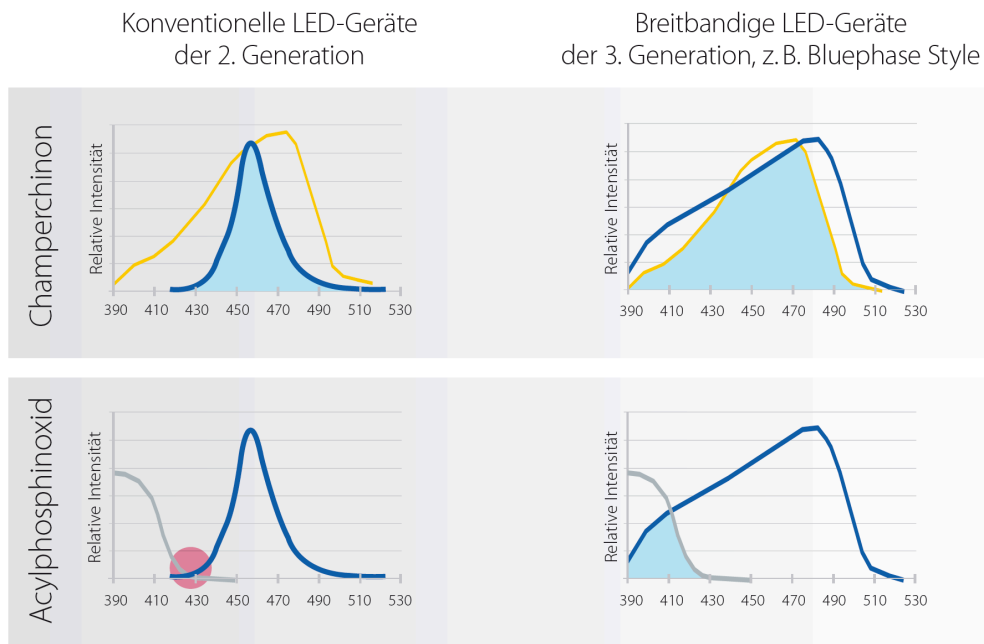


Abb. 2.2-1: Nur bei ausreichender Überlappung (hellblauer Bereich) des Emissionsspektrums des Polymerisationsgerätes (dunkelblaue Linie) mit dem Absorptionsspektrum des Photoinitiators (gelbe bzw. graue Linie) erfolgt eine vollständige Aushärtung (aus: Lichtpolymerisation; Gut wenn man die Fakten kennt, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein [41])

Folgend können Bonding-Materialien und Composite, die ausschließlich *Lucirin® TPO* enthalten, im Gegensatz zu Halogenlichtgeräten, nicht durch konventionelle blaue LEDs polymerisiert werden. Zu diesem Zweck sind die LED-Geräte der dritten Generation mit einem Chip bestückt, der über mehrere LEDs mit verschiedenen Emissionsmaxima verfügt. Beispielsweise liegen bei der *bluephase® 20i* und *G2* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) die Emissionsmaxima der drei blauen LEDs bei 470 nm und das der violetten LED bei 410 nm. Bei der *VALO* (Ultradent, South Jordan, USA) sind zwei blaue LEDs mit einem Emissionsmaximum bei 465 nm und zwei weitere LEDs mit Emissionsmaxima bei 445 nm und 405 nm verbaut. Die verbauten Breitband-Chips der *VALO* und *bluephase® 20i* bzw. *G2* sind dabei in vier gleich große Quadrate einzelner LEDs unterteilt (Abb. 2.2-1 und Abb. 2.2-2).

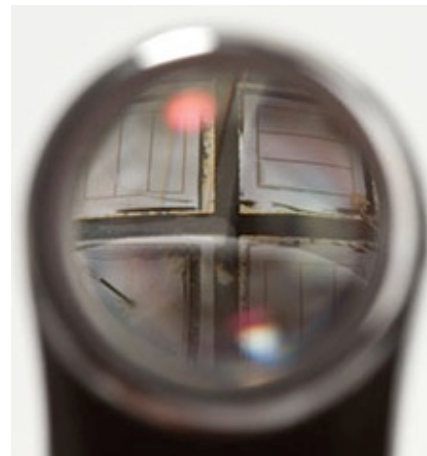
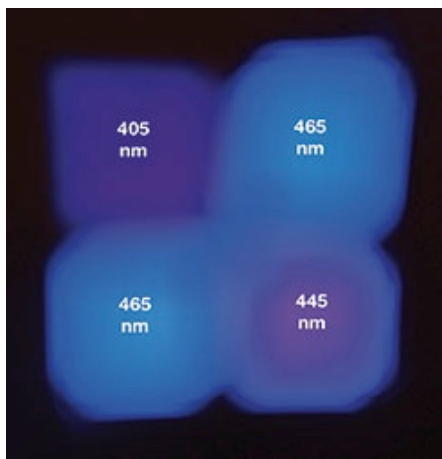


Abb. 2.2-2: Wellenlängenbereiche der vier LEDs der Ultradent VALO und deren Verteilung am Lichtleiterausritt (aus: Feuerstein, P.: *Shine on Brightly* [42])

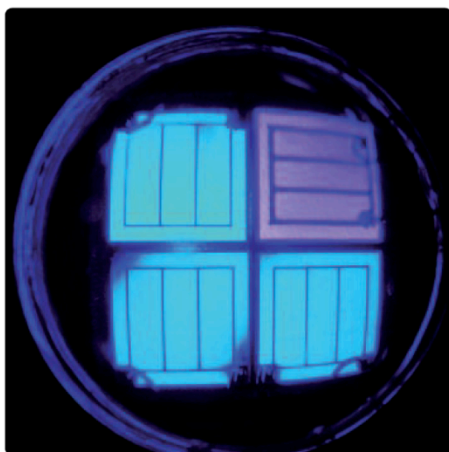


Abb. 2.2-3: Verteilung der vier LEDs auf dem polywave®-Chip der *bluephase® 20i* und *bluephase G2* (aus: *Lichtpolymerisation; Gut wenn man die Fakten kennt*, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein [41])

Der entscheidende Nachteil dieser Geräte besteht in der inhomogenen Ausleuchtung des Lichtfeldes mit den verschiedenen Wellenlängenbereichen. Die einzelnen LEDs sind bei beiden LED-Chips im Quadrat angeordnet und ihr Lichtbild wird durch den Lichtleiter lediglich als Abbild im Raum versetzt [43].

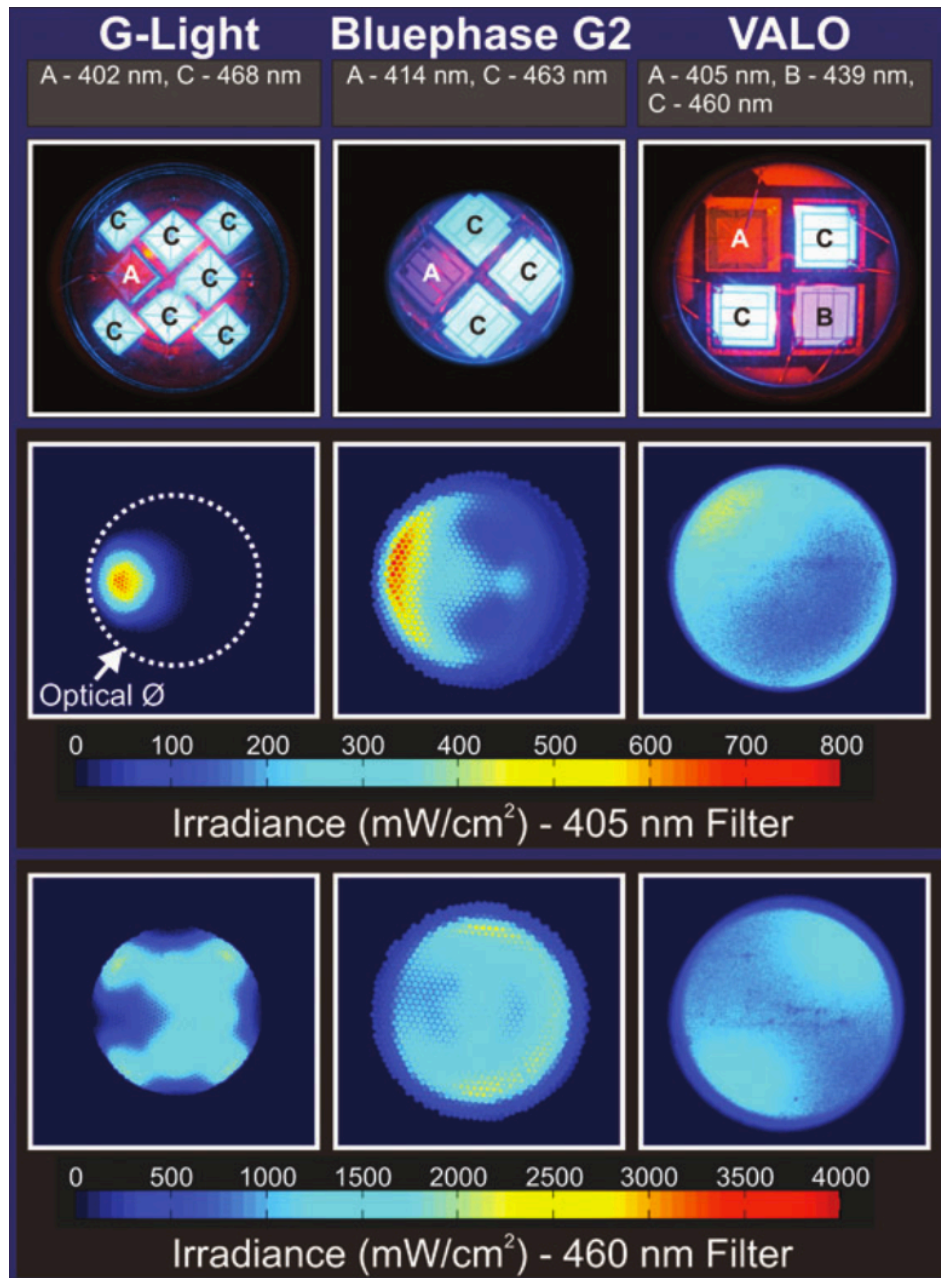


Abb. 2.2-4: Bilder des Lichtfeldes der Polywave-LED-Lampen G-Light, bluephase® G2 und VALO. Oben: Bild durch einen orangefarbenen Filter. Mittig und unten: zweidimensionale isometrische Bilder der Energiedosisverteilung durch verschiedene Bandpassfilter (mittig: 405 nm, unten: 460 nm). Dabei ist A = LED mit Emissionsmaximum bei ca. 405 nm, B und C = LEDs mit Emissionsmaxima bei ca. 440 nm bzw. ca. 460 nm. (aus: Price et al. (2010) [43])

## 2.3 Techniken zur Spannungsreduktion

In der Literatur werden verschiedenste Ansätze und Methoden zur Spannungsreduktion diskutiert. Die spannungsreduzierenden Effekte einiger konventioneller Techniken sind dabei wissenschaftlich eindeutig belegt und gelten als Standardverfahren in der heutigen Füllungstherapie. Dagegen werden die positiven Auswirkungen anderer Techniken teilweise kontrovers diskutiert und sind heute nicht eindeutig belegt. Da nahezu alle konventionellen Techniken einen gesteigerten Zeitaufwand für den Behandler bedeuten, zielen neuere Ansätze oft auf eine Veränderung der chemischen Kompositzusammensetzung ab.

### 2.3.1 Konventionelle Techniken zur Spannungsreduktion

Die etablierteste Technik zur Reduktion von schrumpfungsbedingten Spannungen, auch „Stress“ genannt, ist die Schicht- oder Inkrementtechnik. Bei dieser, zum absoluten Standard gewordenen Technik, werden kleine Inkremente Komposit in die Kavität eingebracht und in Schichten von maximal 2 mm separat ausgehärtet, bis die Kavität vollständig gefüllt ist. Großen Einfluss auf den entstehenden Stress hat außerdem das Kavitätdesign. Je mehr freie Oberfläche das Komposit dabei im Verhältnis zu gebundener bzw. geklebter Oberfläche hat, desto größer ist die Fähigkeit des Komposits, Stress durch freie Schrumpfung zu kompensieren. Das Verhältnis von gebundener zu ungebundener Oberfläche wird als Konfigurationsfaktor, oder auch C-Faktor, bezeichnet [61]:

$$C - \text{Faktor} = \frac{\text{gebundene Fläche}}{\text{ungebundene Fläche}}$$

Dabei gilt allgemein, dass mit steigendem C-Faktor auch der schrumpfungsbedingte Stress zunimmt [62].

Eine Modifikation des C-Faktors der Kavität wird durch die Inkrementtechnik möglich. Außerdem wird die Durchhärtung der einzelnen Inkremente gewährleistet. Die



Inkrementtechnik gilt allerdings nicht als einheitliche Technik. Es gibt viele unterschiedliche geometrische Schicht-Varianten. Einige Autoren zeigten Vorteile bestimmter geometrischer Muster auf [67, 68], andere stellten zwar teilweise Unterschiede im Spannungsmuster fest, konnten jedoch keine signifikant veränderte Gesamtspannungen ermitteln [64]. Es ließ sich allerdings nachweisen, dass die Zahnhöckerauslenkungen beim Legen von Füllungen mit einem Universalkomposit unter Anwendung der Inkrementtechnik signifikant geringer sind, als bei Anwendung der Bulk-Technik [63, 64, 65, 66]. Zu dem konnten *Nikolaenko et al.* (2004) den C-Faktor als wichtigen Einflussfaktor auf den Dentinhaftverbund nachweisen. Ein hoher C-Faktor stellt ihren Untersuchungen nach eine Gefahr für den erfolgreichen Haftverbund zwischen Dentin und Komposit dar [67].

Außerdem werden fließfähige Komposite mit niedrigem E-Modul als sogenannte „Stressbreaker“ diskutiert. Bei dieser Anwendung werden sie als „Lining“ zuerst in die Kavität eingebracht, dünn ausgestrichen und ausgehärtet. Anschließend wird das restliche Volumen konventionell nach der Inkrementtechnik abgefüllt. Der stressreduzierende Effekt und die klinische Relevanz dieser Methode konnte bisher jedoch nicht einheitlich nachgewiesen werden [65, 68, 69, 70, 71], es sei denn das Lining erfolgte in einer sehr dünnen Schichtstärke [72]. Ein positiver Effekt auf die Randqualität von Kompositrestauration scheint jedoch gegeben [73, 74, 75]. Eine ähnliche „Stressbreaker“-Funktion und verbesserte Randqualitäten sollen gefüllte Adhäsive aufgrund ihrer dickeren Schichtstärken im Vergleich zu ungefüllten Adhäsiven erfüllen [67, 76]. Der Versuch, fließfähige Komposite als gefüllte Adhäsive zu verwenden und vollständig auf das Bonding zu verzichten, erwies sich als weniger erfolgreich [76].

Ein weiterer Einflussfaktor auf den polymerisationsschrumpfbedingten Stress und die Randqualität ist die Lichtpolymerisation. Dabei spielt sowohl deren Art, Intensität und Richtung eine Rolle. Neben dem normalen kontinuierlichen Modus der LED- und Halogengeräte, gibt es zwei Soft-Start-Modi: die Soft-Start-Methode und die Pulse-Delay-Methode. Beide sollen vom Prinzip her das gleiche bewirken. Bei der Soft-Start-Methode startet die Polymerisation mit einer geringen Lichtenergie, die innerhalb weniger Sekunden auf den lampenspezifischen Maximalwert ansteigt, der eine adäquate Polymerisation sicherstellt. Ziel dabei ist es, mit einer Verschiebung des Gelpunktes eine Verlängerung der Prä-Gelphase zu erreichen, in der Schrumpfungen

noch durch Kriechvorgänge innerhalb des Materials ausgeglichen werden können [77]. Dadurch soll ein höherer Anteil des Polymerisationsschrumpfes in der Prä-Gelphase stattfinden, wodurch die schrumpfungsbedingten Spannungen abnehmen würden. Die Effektivität der Soft-Start-Polymerisation wird allerdings kontrovers diskutiert [83]. Einige Autoren konnten eine verbesserte marginale Integrität [78,79] und verringerte Schrumpfungswerte feststellen [80, 81], andere wiederum konnten keine signifikanten Unterschiede zur kontinuierlichen Lichtpolymerisation ermitteln [82, 83, 84]. Außerdem scheint die Effektivität der Soft-Start-Methode materialabhängig zu sein [85]. Bei der Pulse-Delay-Methode wird zuerst nur ein kurzer Lichtblitz ausgesendet, worauf eine Verzögerung von einer oder mehreren Minuten folgt. Danach erfolgt die endgültige Polymerisation mit voller Intensität. Die Intensitätswerte und Belichtungszeiten variieren dabei zwischen den verschiedenen Lampen und Studien. Es konnten häufig signifikant geringere Spannungswerte und verbesserte Randqualitäten ermittelt werden [79, 86, 87]. Der Zeitaufwand für den Behandler ist, im Vergleich zur kontinuierlichen Belichtung, durch die Pause nach dem Lichtblitz jedoch deutlich erhöht.

### 2.3.2 Neue Ansätze zur Spannungsreduktion

Trotz aller Methoden zur Spannungsreduktion lässt sich die in der chemischen Annäherung der Moleküle begründete Polymerisationsschrumpfung nach wie vor nicht vermeiden. Deshalb wurde weiter intensiv an der Kompositmatrix geforscht und man entwickelte verschiedene Ansätze. Es entstanden neue, schrumpfkraftreduzierte Komposite mit ringöffnenden Monomeren, die sogenannten Silorane (*Silorane*, 3M Espe AG, Seefeld, Deutschland). Außerdem wurden Komposite mit Polymerisationsmodulatoren entwickelt, die beim Aufbau des Polymernetzwerkes eine schrumpfkraftreduzierende Wirkung haben sollen (*SDR*®, Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland) [51].

Die Silorane enthalten ein siloranbasiertes Harz, das aus Siloxan- und Oxiran-Einheiten besteht, deren funktionellen cycloaliphatischen Oxiran-Gruppen für die geringere Schrumpfung verantwortlich sind [88]. Als cyclische Ether polymerisieren sie, im Gegensatz zur freien radikalischen Polymerisation bei den Methacrylaten, durch einen

kationischen Ringöffnungsmechanismus [89]. Nachteil der *Silorane* ist jedoch, dass sie sowohl ein spezielles Initiatorsystem [89], als auch ein spezielles Adhäsivsystem benötigen (*Silorane Adhesive Bond*, 3M Espe AG, Seefeld, Deutschland) [90], ohne welches sie sich auch nicht mit methacrylatbasierten Kompositen kombinieren lassen. Diverse Studien konnten verminderte Schrumpfungswerte gegenüber herkömmlichen Hybridkompositen und positive Auswirkungen auf die marginale Adaption nachweisen [14, 51, 89, 91, 92].

Im Jahr 2010 wurde mit der Markteinführung von *SDR®* (Smart Dentin Replacement, Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland) innerhalb der Komposite eine neue Gruppe initiiert, die sogenannten Bulk-Fill-Komposite. Das niedrigvisköse *SDR®* enthält eine veränderte Monomer-Chemie mit einem speziellen Polymerisationsmodulator, der in das Harzgerüst der Monomere eingebaut wird. Der Modulator verteilt den Stress während der Aushärtung besser, wodurch die polymerisationsschrumpfbedingten Kräfte und damit die Belastungen auf den adhäsiven Verbund geringer werden [101]. Aufgrund der rasch angestiegenen Beliebtheit des *SDR®*, zogen andere namhafte Komposithersteller nach und brachten ähnliche Produkte dieser Kategorie auf den Markt. Sie erzielen den spannungsreduzierenden Effekt durch verschiedene Kopolymere oder neue Katalysatoren [98].

Generell lassen sich die Bulk-Fill-Komposite heute in zwei Untergruppen einteilen: die niedrigviskösen fließfähigen Bulk-Fills, die über ein verbessertes Adaptationsverhalten an den Kavitätenwänden durch erhöhte Fließeigenschaften verfügen [100] und die hochviskösen modellierbaren Materialien.

| Hersteller       | Niedrigvisköses Bulk-Fill  | Hochvisköses Bulk-Fill    |
|------------------|----------------------------|---------------------------|
| Dentsply DeTrey  | SDR®                       | Quixfil                   |
| Heraeus Kulzer   | Venus® Bulk Fill           |                           |
| 3M ESPE          | Filtek™ Bulk Fill Flowable | Filtek™ Bulk Fill         |
| VOCO             | x-tra base                 | x-tra fil                 |
| Ivoclar Vivadent | Tetric EvoFlow Bulk-Fill   | Tetric EvoCeram Bulk-Fill |
| Kerr             |                            | SonicFill™                |
| Ceramco          | ELS flow                   | ELS                       |

Tabelle 2.3.2-1: Übersicht einiger derzeit erhältlicher Bulk-Fill-Komposite.

Bei allen Bulk-Fill-Kompositen besteht der große Beliebtheitsfaktor darin, dass Kavitäten bis zu einer Schichtstärke von 4 mm aufgefüllt und ausgehärtet werden können. Für den Behandler ergibt sich damit, im Vergleich zur konventionellen Inkrementtechnik mit maximalen Schichtstärken von 2 mm, eine deutliche Zeitersparnis [8, 9, 10]. Bezogen auf die Langlebigkeit und Biokompatibilität der Füllung hat sich die Inkrementtechnik bisher als bevorzugte Technik bewährt [11], jedoch konnten diverse Autoren in vitro keinen negativen Einfluss der erhöhten Schichtstärke auf die Randqualität feststellen [93, 94, 95]. Des Weiteren konnten die Herstellerangaben bezüglich der Aushärtungstiefen für diverse Bulk-Fill-Komposite bestätigt werden [96, 97, 98, 115]. Um diese hohen Aushärtungstiefen zu ermöglichen, weisen die Bulk-Fill-Komposite helle Farben, erhöhte Transluzenzen [12], sowie verringerte Füllermengen auf, die allerdings je nach Bulk-Fill-Komposit stark variieren [95]. Aus diesen Anpassungen resultieren nachteilige ästhetische Einbußen [99, 100], sowie verminderte physikalische Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Abrasionsstabilität [95]. Deshalb sind zumindest für die fließfähigen Bulk-Fills im kaulastragenden Bereich Deckfüllungen mit Hybridkompositen notwendig [95, 101]. Außerdem sind einigen Bulk-Fill-Kompositen zum Zweck der erhöhten Aushärtungstiefe weitere Photoinitiatoren beige-fügt (*Ivocerin®* in *Tetric EvoCeram Bulk Fill & Tetric EvoFlow Bulk Fill*, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) [13, 29].

Zur klinischen Evidenz der Funktionsweise der Bulk-Fill-Komposite gibt es bisher nur wenige Studien. Die bisher vorliegenden Studien bescheinigen den getesteten Bulk-Fill-Kompositen allerdings eine ähnliche klinische Performance, wie herkömmlichen, mit der Inkrement-Technik gelegten Kompositrestaurationen [102, 103, 104, 105]. Klinische Langzeitergebnisse lassen jedoch noch auf sich warten, da die längste klinische Beobachtungszeit bis jetzt erst fünf Jahre beträgt [103].

## 2.4 Polarisiertes Licht

Eine wichtige physikalische Grundlage der in dieser Arbeit verwendeten spannungsoptischen Messmethode ist polarisiertes Licht. Licht kann man nach der Wellentheorie als schwingende elektromagnetische Transversalwellen beschreiben. Der senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung in der Schwingungsebene liegende elektrische Feldvektor  $E$  beschreibt dabei die Lichtwelle. Außerdem steht der magnetische Feldvektor senkrecht auf  $E$ .

Bei einem gewöhnlichen Lichtbündel liegen die Schwingungsebenen der einzelnen Lichtwellen ungeordnet in verschiedenen Winkeln zueinander. Jede Einzelwelle zeichnet sich also durch die Richtung ihrer Schwingungsebene aus. Bezogen auf die Summe der Einzellichtwellen eines Lichtbündels trifft das nicht mehr zu, da die Einzelebenen ungeordnet zueinander liegen.

Beim polarisierten Licht unterscheidet man zwischen linear und elliptisch polarisiertem Licht. Bei einem Lichtbündel aus linear polarisiertem Licht sind die Schwingungsebenen aller Wellen parallel und liegen somit in einer Ebene [106]. Hier hat die Summe der Einzelwellen des Lichtbündels also die gleiche Richtung, wie jede enthaltene Einzelwelle.

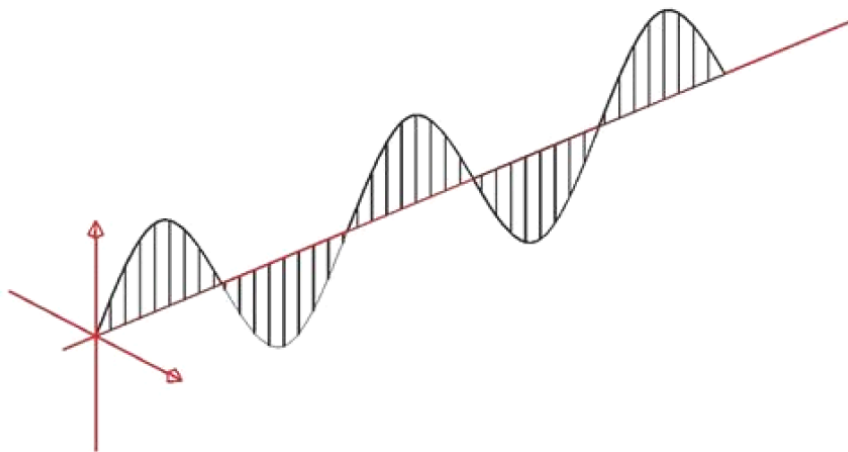


Abb. 2.4-1: linear polarisierte Welle. (aus: Dissertation Klingler, 2004 [107])

Beim elliptisch polarisierten Licht entsteht ein Lichtvektor  $E$ , der die als Achse gedachte Laufrichtung der Welle umkreist, jedoch seine Länge periodisch ändern kann.  $E$  wird gebildet, wenn sich zwei kohärente linear polarisierte Wellen mit gleicher Wel-

lenlänge überlagern, deren Schwingungsebenen nicht parallel sind.

Ein Sonderfall des elliptisch polarisierten Lichtes stellt das im Versuchsaufbau verwendete zirkular polarisierte Licht dar. Es kommt zustande, wenn die beiden sich überlagernden Wellen senkrecht zueinander mit einer Phasendifferenz von  $\pi/4$  schwingen, wobei je nach Drehrichtung von  $E$  rechts- und linkszirkular polarisiertes Licht unterschieden wird [108]. Der rotierende Lichtvektor hat hierbei eine konstante Länge. Wenn die Phasenverschiebung wie im Versuchsaufbau  $\Delta\varphi = \lambda/4$  beträgt, entsteht die zirkular polarisierte Welle  $E_1 + E_2 = E_z$  [108].

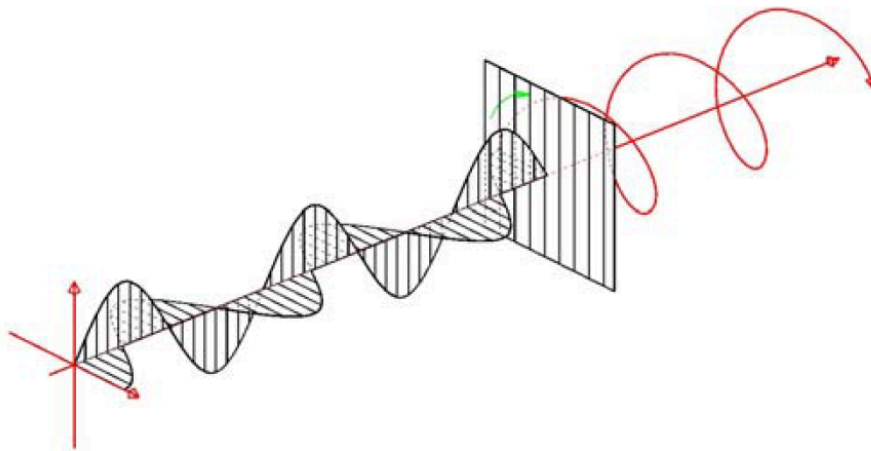


Abb. 2.4-2: linear polarisierte Wellen  $E_1$  und  $E_2$  und die durch Überlagerung beider entstehende zirkular polarisierte Welle  $E_z$ . (aus: Dissertation Klingler, 2004 [107])

### 3 Material & Methode

#### 3.1 Versuchsmaterialien

Die neuen Methoden der Steuerung der Lichtpolymerisation wurden an dem Bulk-Fill-Flowable *x-tra base* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) untersucht. Das Material ist mit allen methacrylatbasierten Bondings und Kompositen kombinierbar. In den ersten Vorversuchen und bei allen Schichtfüllungsversuchen wurde dasselbe Bonding-Verfahren angewandt, das auch schon *Nötzel* (2008) und *Dudda* (2014) nutzten. Dort kamen zum Anrauen der Kavitäten rosa Steinchen oder diamantierte Schleifinstrumente zum Einsatz und als Bonding-Material wurde *Solobond M* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) verwendet. Vor allem während höherer Umgebungstemperaturen traten bei Füllungsmethoden mit höheren Spannungswerten innerhalb der Vorversuche jedoch vermehrt Verbundfehler zwischen Bondingmaterial und Kavitätenwand auf. Deshalb entschlossen wir uns dazu, ein neues Bonding-Verfahren für die Hauptversuche zu entwickeln. Zur Oberflächenvergrößerung strahlten wir die Versuchskavitäten unter Verwendung des Feinstrahlgerätes Renfert Basic Classic 2945-2025 (Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) mit Aluminiumoxidpartikeln der Körnungsgröße 110 µm (Korox®, Bego GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland) ab. Als Bondingmaterial verwendeten wir bei den Hauptversuchsreihen *Adhese Universal* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein).

Je nach Technik wurden die Kavitäten bei den Versuchen teilweise in einer Schicht bis zu 4 mm aufgefüllt und ausgehärtet. Für diese Versuche kam aufgrund seiner hohen Aushärtungstiefe nur ein Bulk-Fill Komposit in Frage. Zur besseren Vergleichbarkeit nutzten wir das *x-tra base* auch für alle anderen Versuche. Der Hersteller gibt für das *x-tra base* eine Polymerisationszeit von 10 s in der Universalfarbe, bzw. 20-40 s in der Farbe A2 an, die jedoch an die Leistung der Polymerisationslampe angepasst werden muss [110]. Um eine vollständige Polymerisation zu gewährleisten, wurden Versuche zur Aushärtungstiefe von *x-tra base* mit dem verwendeten Prototyp der Polymerisationslampe durchgeführt und die Aushärtungszeiten dementsprechend angepasst, um eine adäquate Polymerisation zu gewährleisten.

### 3.1.1 Prototyp einer Polymerisationslampe mit zwei Wellenlängen

Wie bereits angesprochen wurde für die neuen Methoden der Steuerung der Lichtpolymerisation ein neuer Typ einer LED-Polymerisationslampe benötigt und sollte in dieser Arbeit entwickelt werden. Dazu suchten wir uns zuerst auf dem Markt zwei LEDs aus, deren Emissionsmaxima zu den Absorptionsspektren der Photoinitiatoren Kampferchinon und *Lucirin® TPO* passten. Die Emissionsmaxima der ausgewählten LEDs liegen laut Herstellerangaben bei 400 nm (violett) und 465 nm (blau). Weitere wichtige technische Daten der LEDs sind in Tab 3.1.1-1 aufgeführt.

| Technische Daten | blaue LED<br>(GP Lighting) | violette LED<br>(Winger Electronics GmbH) |
|------------------|----------------------------|---|
| Wellenlänge      | 465 nm                     | 400 nm                                    |
| Spannung         | 4,7 V                      | 3,4 V                                     |
| Strom (max.)     | 1400 mA                    | 700 mA                                    |
| Leistung         | 5 W                        | 3 W                                       |
| Öffnungswinkel   | 120°                       | 130°                                      |

Tab. 3.1.1-1: wichtige technische Daten der in der neuen Polymerisationslampe verbauten LEDs

Die gleichmäßige Intensitätsverteilung beider LEDs im Strahlungsfeld der Lampe konnten wir realisieren, in dem wir die beiden LEDs in ein ausgeschachtetes Gehäuse einer alten Halogenlampe verbauten und im 90°-Winkel über einen dichroitischen Spiegel zentral auf den Lichtleiter ausrichteten (siehe Abb. 3.1.1-1). Der dichroitische Spiegel war zusätzlich sehr hilfreich bei der Eingrenzung der LED-Emissionsspektren, da seine Übergangswellenlänge bei 435 +/- 10 nm liegt. Wie in den Vorversuchen deutlich wurde, ist diese Eingrenzung für unsere Methoden essentiell, da die verwendeten LEDs nicht ausschließlich Licht mit 400 nm bzw. 465 nm emittieren, sondern immer auch einen kleinen Lichtanteil ober- und unterhalb dieser Wellenlänge abstrahlen. Der dichroitische Spiegel entfernt die emittierten Lichtanteile der violetten LED oberhalb von 435 nm genauso aus dem Strahlengang, wie die von der blauen LED emittierten Lichtanteile unterhalb von 435 nm. Dadurch wird bei zweizeitiger Bestrahlung gewährleistet, dass der erste Initiator nur durch Licht der ersten Wellenlänge und der zweite Initiator nur durch Licht der zweiten Wellenlänge aktiviert wird.



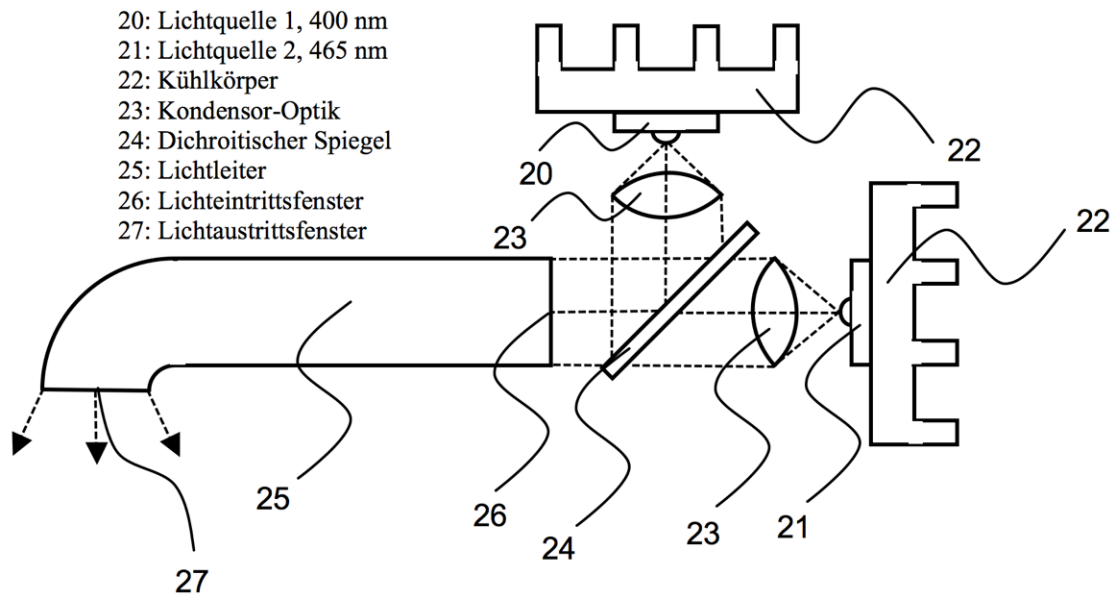


Abb. 3.1.1-1: Konstruktionszeichnung der neuen Polymerisationslampe aus der europäischen Patentanmeldung (EP 3 173 062 A1 – Veröffentlichungstag: 31.05.2017)

Die Energiedichten der verschiedenen Modi der neuen Polymerisationslampe wurden mit dem *Broadband Power/Energy Meter 13 PEM001* (Melles Griot, Rochester, NY, USA) im Abstand von 5 mm und 10 mm auf ein rundes, im Durchmesser 10 mm großes Messfenster ermittelt. Die gemessenen Werte der einzelnen Modi sind der Tabelle 3.1.1-2 zu entnehmen.

| Modus          | Leistung bei 5 mm Abstand | Leistung bei 10 mm Abstand |
|----------------|---------------------------|----------------------------|
| violett        | 153 mW/cm <sup>2</sup>    | 125 mW/cm <sup>2</sup>     |
| blau           | 280 mW/cm <sup>2</sup>    | 229 mW/cm <sup>2</sup>     |
| blau + violett | 433 mW/cm <sup>2</sup>    | 350 mW/cm <sup>2</sup>     |

Tab. 3.1.1-2: Energiedichte der verschiedenen Modi der neuen Polymerisationslampe gemessen mit dem *Broadband Power/Energy Meter 13 PEM001* im Abstand von 5 mm und 10 mm zum Messfenster.

Die beiden LEDs der neuen Polymerisationslampe lassen sich durch einen selbst konstruierten Steuerungscomputer (siehe Abb. 3.1.1-2) unabhängig voneinander in ihrer Bestrahlungsintensität und -dauer variieren. Außerdem ermöglicht dieser Computer einen verzögerten, automatisch einsetzenden Bestrahlungsbeginn einer der LEDs.



Abb. 3.1.1-2: Steuerungscomputer und dazugehörige neue Polymerisationslampe mit beiden Modi.

Wie in Kapitel 2.2 angesprochen gibt es zwar LED-Polymerisationslampen der dritten Generation auf dem Markt, wie z.B. die *bluephase® 20i* bzw. G2 (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) oder die *VALO* (Ultradent, South Jordan, USA), die bereits mit LEDs verschiedener Wellenlängen ausgestattet sind. Für die Versuche dieser Arbeit waren diese Lampen jedoch nicht geeignet, da die unterschiedlichen Emissionsmaxima der verschiedenen LEDs von den Herstellern nur parallel genutzt werden, um insgesamt ein breiteres Emissionsspektrum zu erhalten [111]. Im Vergleich zum Emissionsspektrum konventioneller LED-Lampen der ersten und zweiten Generation von ca. 430 nm – 490 nm, emittiert beispielsweise die *bluephase® 20i* Licht im Wellenlängenbereich von 385nm – 515 nm [41]. Dadurch lassen sich neben dem Kampferchinon auch andere Photoinitiatoren, wie z.B. *Lucirin® TPO* ausreichend aktivieren [43]. Manche Studien konnten für einige Komposite bei gleicher Belichtung und Energiedosis mit Breitband-LED-Lampen höhere Polymerisationsgrade nachweisen, als bei Belichtung mit konventionellen blauen LED-Lampen [43, 111, 112].

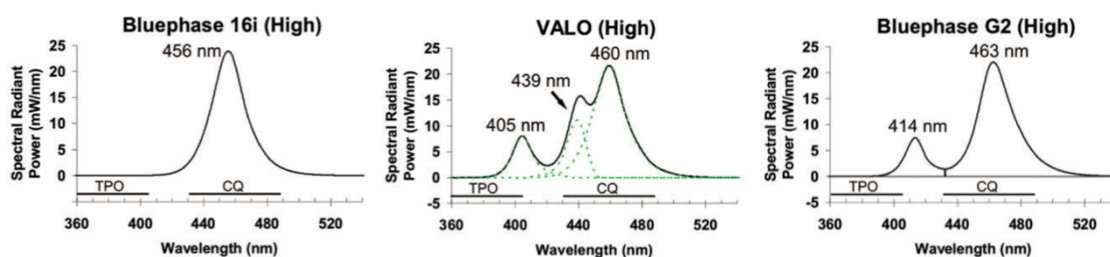


Abb.3.1.1-2: spektrale Energiedosis als Funktion der Wellenlänge in der High-Output-Einstellung der Monowave-LED-Lampe *bluephase® 16i*, sowie der Polywave-LED-Lampen *VALO* und *bluephase® G2*. Die Halbwertsbreite der Absorptionsspektren von Kampferchinon (CQ) und *Lucirin® TPO* (TPO) sind durch horizontale Linien angegeben. (nach: Price et al. (2010) [43])

### 3.1.2 Lichtempfindlichkeit von x-tra base

Bei allen Versuchen muss eine ausreichende Polymerisation des verwendeten Komposits gewährleistet sein, da etwaige Spannungsreduktionen ansonsten auf in der Tiefe unvollständig polymerisiertes Komposit zurückgeführt werden könnten. Diesbezüglich wurde in Anlehnung an ISO 4049 eine orientierende Untersuchung zur Aushärtungstiefe von *x-tra base* mit der neuen Polymerisationslampe durchgeführt. Ob sich die ISO 4049 allerdings exakt auf Bulk-Fill-Komposite beziehen lässt, wird zur Zeit diskutiert. *Flury et al.* (2012) zeigten für einige Bulk-Fill-Komposite, dass man mit dem Kratztest nach ISO 4049 Norm, verglichen zur Ermittlung der Aushärtungstiefe über Vickers-Härteprofile, zu hohe Werte für die Aushärtungstiefen erhält [113].

Zuerst wurden die Aushärtungstiefen für herkömmliches *x-tra base* mit der Halogenlampe *Translux CL* (Heraeus Kulzer, Bad Sachsa, Deutschland) und der neuen Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus untersucht. Dazu füllte man das zu untersuchende Komposit in lichtundurchlässige Röhrchen, deren Böden mit transparenten, lichtdurchlässigen Kunststoffplättchen verschlossen waren. Die Röhrchen wurden im Anschluss so unter einer Messuhr eingespannt, dass sich die jeweilige Probe immer noch durch den Boden belichten ließ. An der offenen Oberseite konnte man ein mit der Messuhr verbundenes, dünnes Metallstäbchen so weit in die Probe eintauchen, bis es auf der Oberfläche der bereits erhärteten Schicht auftraf. Vor der ersten Aushärtungssequenz versenkte man das Metallstäbchen bis zum Kontakt mit dem transparenten Boden in die Probe, nullte die Messuhr und zog das Stäbchen wieder heraus. Dadurch war es nun möglich, das Stäbchen nach jedem Aushärtungsschritt erneut in die Probe abzusenken und direkt an der Messuhr die Dicke der im jeweiligen Zeitraum erhärteten Schicht abzulesen. Nach ISO 4049 halbierte man diesen Wert dann. Die Belichtungszeit wurde dabei von 5 s beginnend bis auf 160 s Gesamtzeit stets verdoppelt.

In einigen Versuchen dieser Arbeit werden spezielle Anforderungen an das violette Licht der neuen Polymerisationslampe gestellt. Es muss durch einen bereits ausgehärteten, knapp 4 mm dicken Block aus herkömmlichem *x-tra base* hindurch eine dünne Schicht (< 0,5 mm) *x-tra base* mit dem Photoinitiator *Lucirin® TPO* aushärten. Ob mit dem violetten Licht-Modus der neuen Lampe eine adäquate Polymerisation dieser Schicht durch den Block gegeben ist, wurde mit demselben Versuchsaufbau und den

gleichen Belichtungszeiten getestet, wie auch schon der Blaulicht-Modus. Der transparente Boden der Röhrchen wurde hierfür allerdings durch einen 4 mm starken, bereits ausgehärteten *x-tra base* Block ersetzt, auf den man dann das fließfähige *x-tra base* mit *Lucirin® TPO* gab. Im Anschluss wurde dieses von unten durch den Block nach dem gleichen Versuchsprotokoll wie oben ausgehärtet. Auch hier senkte man nach jeder Belichtungssequenz das Metallstäbchen in die Probe ab, um die bereits erhärtete Schichtdicke abzulesen und nach ISO 4049 durch zwei zu teilen.

Insgesamt sollen diese beiden Versuchsreihen den Nachweis dafür bringen, dass es bei keinem der Füllungsversuche dieser Arbeit unvollständig polymerisierte Bereiche in den Kompositmaterialien gab, auf die sich etwaige Spannungsreduzierungen zurückführen lassen könnten. In Abb. 3.1.1-1 kann man einen positiv linearen Zusammenhang zwischen der Belichtungszeit und der Aushärtungstiefe von *x-tra base* bei logarithmischer Skalierung der Abszisse erkennen. Dieser konstante Zuwachs an Aushärtungstiefe bei Verdopplung der Belichtungszeit wird für Komposite auch in der Literatur beschrieben [116].

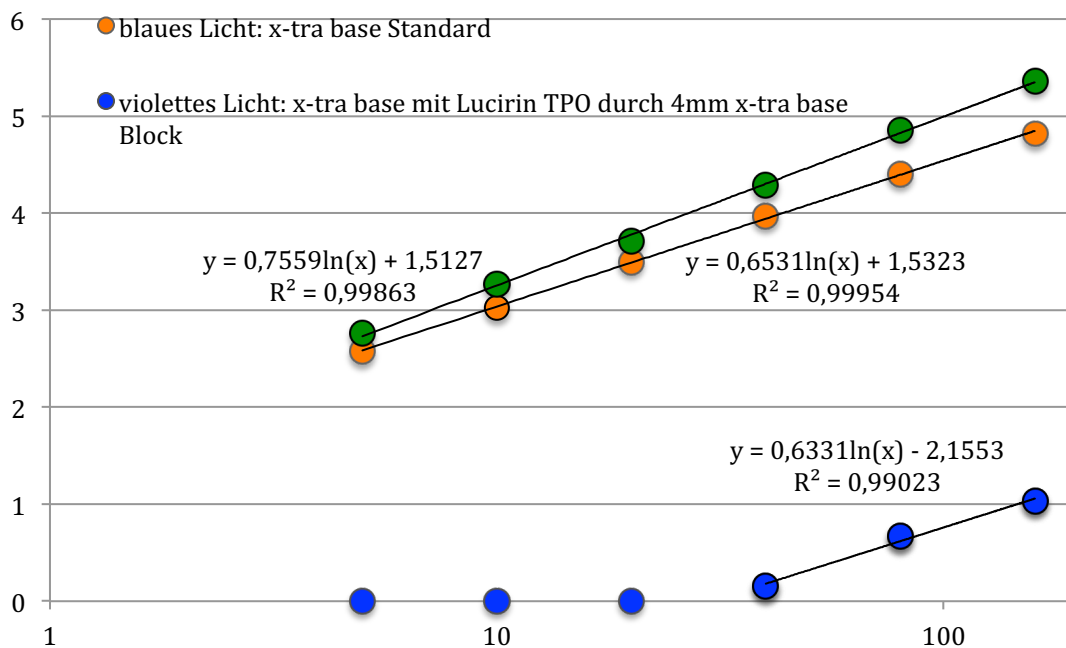


Abb. 3.1.2-1: Aushärtungstiefen von *x-tra base* der Farbe A2 mit der in den Vorversuchen verwendeten Halogenpolymerisationslampe Translux CL und der neuen Polymerisationslampe bei Verwendung des Blaulicht-Modus, sowie von *x-tra base* mit *Lucirin® TPO* bei Verwendung des violetten Licht-Modus durch einen 4 mm *x-tra base* Block (in Anlehnung an ISO 4049). Die Belichtungszeit in Sekunden ist logarithmisch aufgetragen.

### 3.2 Spannungsmessung

*Klinger* und *Gente* entwickelten den hier verwendeten spannungsoptischen Versuchsaufbau. Er wurde von *Klinger* (2004) [107] ausführlich beschrieben und kam bei den Dissertationen von *Nötzel* (2008) [109], *Dudda* (2014) [45] und *Sultan* (2015) [121] erfolgreich zum Einsatz. Allerdings waren die Kameratechnik und Videoverarbeitung nicht mehr auf dem neuesten Stand der Technik, weshalb sie für diese Arbeit optimiert und digitalisiert wurden.

Im Folgenden werden die Funktionsweise der Spannungsoptik und die Durchführung der verschiedenen Versuche ausführlich erläutert, sowie die vorgenommenen Verbesserungen beschrieben.

#### 3.2.1 Spannungsoptischer Versuchsaufbau

Die Messungen wurden mit rotem Licht ( $\lambda = 635 \text{ nm} \pm 25 \text{ nm}$ ) durchgeführt, das nicht in das Absorptionsspektrum der hier verwendeten Photoinitiatoren (Kampferchinon:  $\lambda = 370 - 500 \text{ nm}$  [39], *Lucirin® TPO*:  $\lambda = 380 - 430 \text{ nm}$  [27]) fällt. Aus diesem Grund kann es keinen der Photoinitiatoren aktivieren und hat somit auch keinen Einfluss auf die Polymerisation des untersuchten Komposits.

Die Lichtwellen der punktförmigen Lichtquelle werden zuerst durch eine Linse (Kondensor) parallelisiert. Anschließend passieren die parallelen Lichtwellen den Polarisator, der lediglich Wellen einer bestimmten Polarisationsrichtung passieren lässt. Darauf folgend wird eine Schwingungsebene des Lichtes durch eine  $\lambda/4$  - Platte um genau ein Viertel der Wellenlänge verschoben. Durch Anordnung dieser Platte im  $45^\circ$ -Winkel zur Polarisationssebene wird zirkular polarisiertes Licht erzeugt, das dann einen Probenkörper mit gefrästen Versuchskavitäten passiert. Dieser besteht aus *Araldit B*, einem Epoxidharz mit sehr kleiner spannungsoptischer Konstante. Mechanische Spannungen wirken somit im *Araldit B* besonders doppelbrechend auf das zirkular polarisierte Licht, wodurch eine Phasenverschiebung der beiden Wellen erzielt wird. Danach wird das zirkular polarisierte Licht durch eine weitere  $\lambda/4$ -Platte wieder in linear polarisiertes Licht gewandelt und passiert einen Analysator, der genau wie der Polarisator

eine Schwingungsebene des linear polarisierten Lichtes herausfiltert. Analysator und Polarisator werden dabei in gleiche Drehrichtungen des Lichtes ausgerichtet.

Nachdem das Licht den Analysator passiert hat, werden die Orte gleicher Spannung bzw. die Orte gleicher Hauptspannungsdifferenz als helle und dunkle Linien sichtbar, die man als Spannungslinien oder Isochromaten bezeichnet. Das Isochromatenbild wird mit einer HD-Kamera (BSC HD 1, B&S Technology GmbH) aufgezeichnet, an einen PC übertragen, gespeichert und ausgewertet.

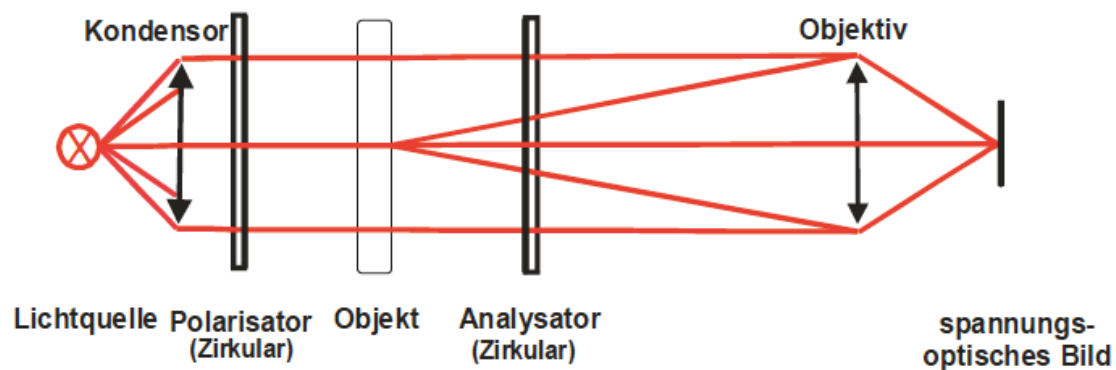


Abb. 3.2.1-1: schematischer Versuchsaufbau mit Strahlengang. Polarisator und Analysator enthalten neben dem Polarisationsfilter für linear polarisiertes Licht auch die erforderliche  $\lambda/4$ -Platte.  
(aus: Dissertation Klingler, 2004 [107])

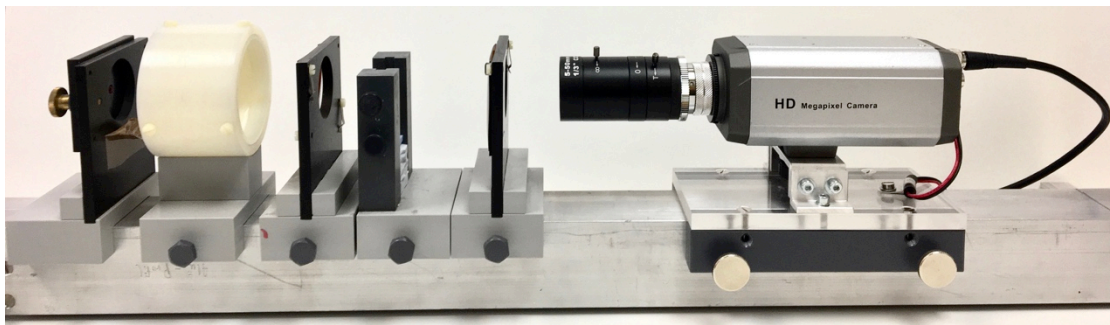


Abb. 3.2.1-2: Bild des Versuchsaufbaus der spannungsoptischen Messmethode.

### 3.2.2 Modellkavitäten

Die jeweils vier Modellkavitäten der Größe 5x5x5mm wurden in einen Modellkörper aus *Araldit B* mit den Abmessungen 35 x 35 x 5mm gefräst (siehe Abb. 3.2.2-1). Die Spannungsbilder der Kavitäten beeinflussen sich dabei gegenseitig nicht.

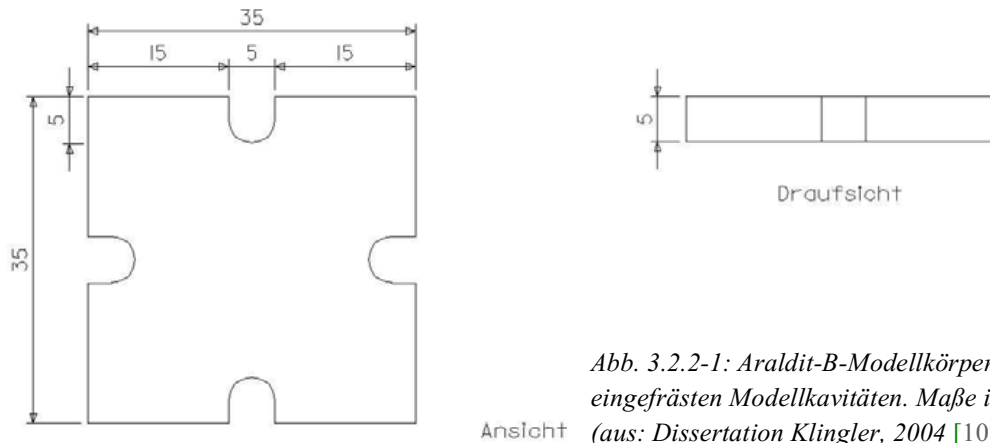


Abb. 3.2.2-1: Araldit-B-Modellkörper mit vier eingefrästen Modellkavitäten. Maße in mm.  
(aus: Dissertation Klingler, 2004 [107])

Das Material *Araldit B* stammt von der Firma Tiedemann (Garmisch-Patenkirchen, Deutschland). Die entsprechenden Zuschnitte und Kavitätenfräsungen wurden vom Feinmechanikermeister Armin Heimann der Philipps-Universität Marburg durchgeführt.

*Araldit B* ist ein Epoxidharz mit sehr kleiner spannungsoptischer Konstante, d. h. mechanische Spannung können in diesem Material sehr gut dargestellt werden. Die gefrästen Kavitäten haben eine Gesamttiefe von 5 mm, wovon die oberen 2,5 mm gerade Wände und die unteren 2,5 mm kreisförmige Wände aufweisen. Das Gesamtvolumen der Kavität ergibt somit  $V = 112 \text{ mm}^3$  mit einem realistischen C-Faktor von 0,92 [107]. Da die Kavitäten aber nur bis zur maximal vom Hersteller empfohlenen Schichtstärke von 4 mm aufgefüllt wurden, beträgt das Volumen der Versuchsfüllungen nur  $V = 87 \text{ mm}^3$  mit einem C-Faktor von 0,91 [107]. Durch die Einfräsung der Kavitäten entstehen Eigenspannungen im Material, die vor den Versuchen beseitigt werden müssen. Dazu wurden die Platten gemäß dem von *Nötzel* vorgegebenem Temperatur-Zeitverlauf getempert [109].

### 3.2.3 Versuchsdurchführung und -dokumentation

Bei den Schichtfüllungsversuchen kam noch das Bonding-Verfahren zum Einsatz, das bereits von *Nötzel* (2008) und *Dudda* (2014) verwendet wurde. Dabei wurden zuerst die Kavitätenwände vorsichtig mit einem rosa Steinchen oder einem diamantierten Schleifinstrument angeraut. Danach wurde mit einem feinen Pinsel das Bonding-Material *Solobond M* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) aufgetragen, verblasen und 20 s lichtgehärtet. Wie bereits in Kapitel 3.1 angesprochen, konnte für die Hauptversuche eine zuverlässigere Bondingmethode gefunden werden. Anstatt die Kavitätenwände mit Schleifinstrumenten anzurauen, strahlten wir die Versuchskavitäten zur Oberflächenvergrößerung mit Aluminiumoxidpartikeln der Körnungsgröße 110 µm (Korox®, Bego GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland) ab. Als Bondingmaterial verwendeten wir bei den Hauptversuchsreihen *Adhese Universal* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), das mit einem Single Tim Applikationspinsel (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) sorgfältig aufgetragen wurde. Erst nach mindestens 60 s Einwirkzeit verpüsterte man dieses und härtete es nach Herstellerangabe 20 s mit der LED-Polymerisationslampe *Celalux 2* aus. Nach beiden Bondingmethoden wurden die offenen Seiten der Kavitäten temporär mit zwei dünnen Mikroskopierdeckgläschen (Firma Kobe, Marburg, Deutschland) verschlossen, die man spannungsfrei mit *Hellobond* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) am *Araldit B* Plättchen befestigte. So konnte während des Füllungs Vorganges kein Komposit wegfließen. Im Anschluss wurden die Plättchen jeweils mit Probennummer und Datum beschriftet und in den spannungsoptischen Versuchsaufbau eingebracht. Danach startete man die digitale Videoaufnahme am PC in schwarz-weiß mit dem Programm *Stream Catcher* (Data Becker GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Deutschland) und begann mit dem Füllungsprozess. Die Kavitäten wurden dabei mit der jeweiligen Methode gefüllt und nach dem zur Methode passenden Belichtungsprotokoll ausreichend lichtpolymerisiert. Bei allen Füllungsmethoden waren die Kavitäten am Ende bis zu einer Gesamthöhe von 4 mm aufgefüllt.

Nach 1000 s wurde dann die Videoaufnahme beendet und der gesamte Füllungs- und Aushärtungsprozess digital mit Versuchsbezeichnung, Probennummer und Datum gespeichert. Zusätzlich erstellte man bei 1000 s nach Füllungsbeginn ein Standbild und



speicherte es mit der Videodatei.

### 3.2.4 Versuchsauswertung

Die Standbilder wurden dann jeweils an drei Stellen, unten mittig und jeweils rechts und links am Übergang von gerade zu gekrümmter Kavitätenwand, mit dem Bildverarbeitungsprogramm *ImageJ* (RSB, USA) vermessen und ausgewertet.

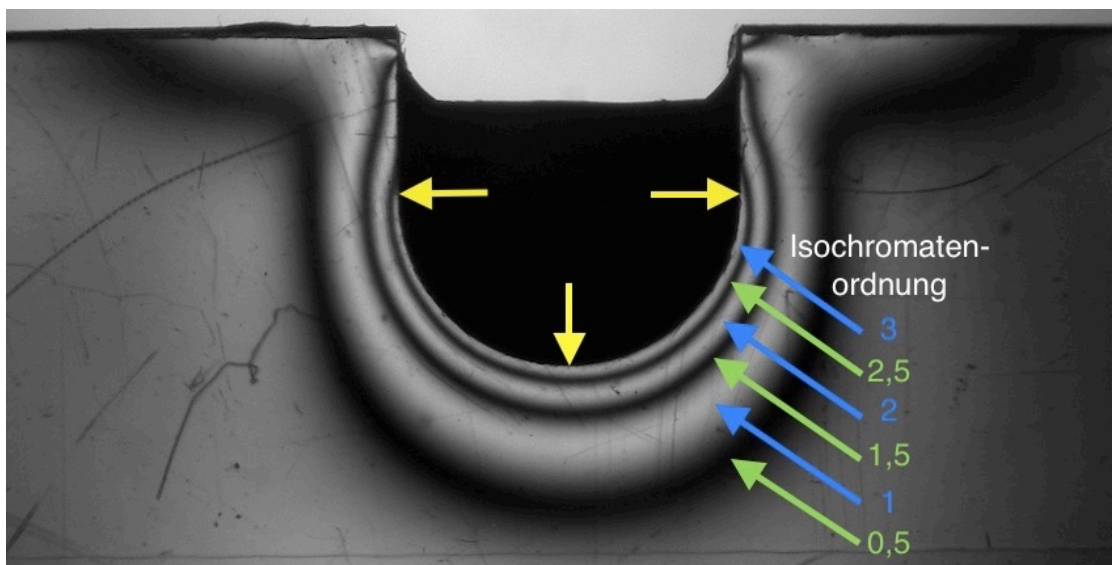


Abb. 3.2.4-1: *x-tra base* Füllung mit neuer Methode. Die gelben Pfeile zeigen die drei Messstellen. Die grünen und blauen Pfeile zeigen die Zuordnung der Spannungsringe zu den Isochromatenordnungen.

Mit dem Programm wurde die relative Helligkeit eines ausgewählten Abschnittes bestimmt. Dieser beginnt an der Kavitätenwand und endet erst hinter dem äußersten Spannungsring (siehe gelbe Pfeile in Abb. 3.2.4-2). Innerhalb des jeweiligen Abschnittes lässt sich der Abstand der hellen und dunklen Spannungsringe, der sog. Isochromaten, von der Kavitätenwand bestimmen. Da das Programm jedoch nur Helligkeitsprofile waagerecht von links nach rechts ausgeben kann, erstellte man von jedem 1000 s - Standbild zwei Duplikate. Wie in Abb. 3.2.4-2 zu erkennen ist, wurde eines der Duplikate um 90° gedreht und eines gespiegelt, um die Probe an allen drei festgelegten Messstellen der Helligkeit nach vermessen zu können. In der Abb. 3.2.4-1 ist exemplarisch eine Füllung mit dem Komposit *x-tra base* zu sehen, bei dem eine der neuen Me-

thoden angewendet wurde. Am dazugehörigen Helligkeitsprofil in Abb. 3.2.4-3 kann man die Anzahl der Isochromatenordnungen und deren Entfernung von der Kavitätenwand in Pixeln anhand der Helligkeitsmaxima und -minima ablesen.

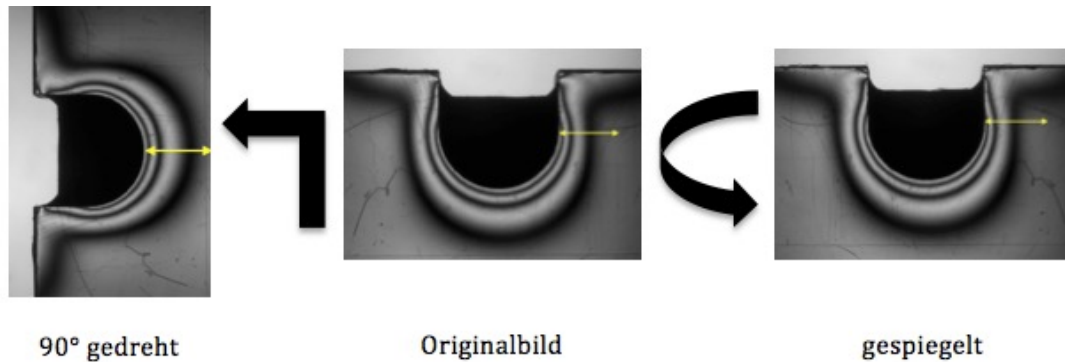


Abb. 3.2.4-2: Um an allen drei Messstellen ein Helligkeitsprofil des jeweiligen Abschnittes erstellen zu können, benötigt man zwei Duplikate des Originalbildes (gespiegelt und 90° gedreht). Die Messbereiche sind durch die gelben Doppelpfeile kenntlich gemacht.

Die Extrempunkte wurden anschließend mit ihrer Entfernung in Pixeln gegen die dazugehörige Ordnung in *Excel* (Microsoft Office für Mac 2011) aufgetragen (Abb. 3.2.4-4). Mittels linearer Regression legte man eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte. Deren Schnittpunkt mit der Abszisse gibt annähernd die an der Kavitätenwand vorliegende Isochromatenordnung an. Bei diesem Beispiel sind es 3,2 Ordnungen.

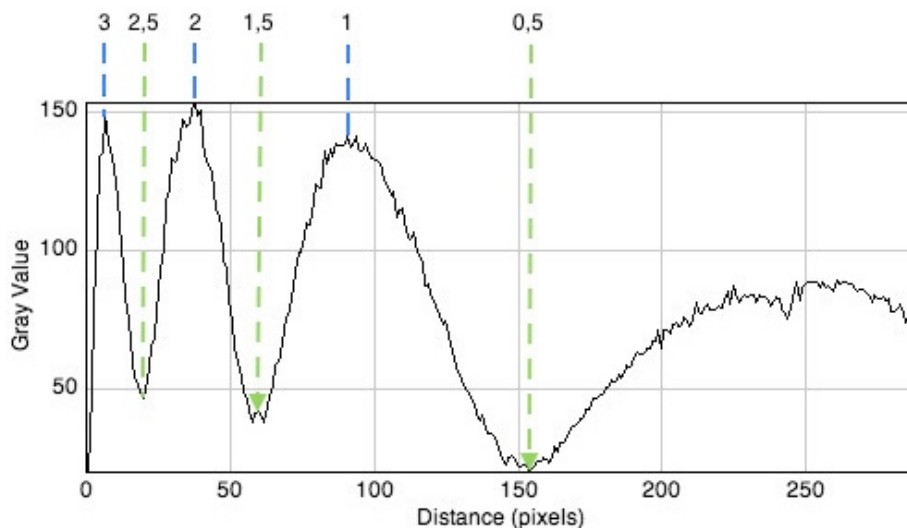


Abb. 3.2.4-3: ImageJ-Helligkeitsprofil der exemplarischen Füllung aus Abb. 3.2.4-1. Es zeigt die Helligkeit in Abhängigkeit vom Abstand zur Kavitätenwand (in Pixeln). Dabei bildet die Kavitätenwand den Nullpunkt. Die lokalen Extrema geben die Lage der Isochromaten an.

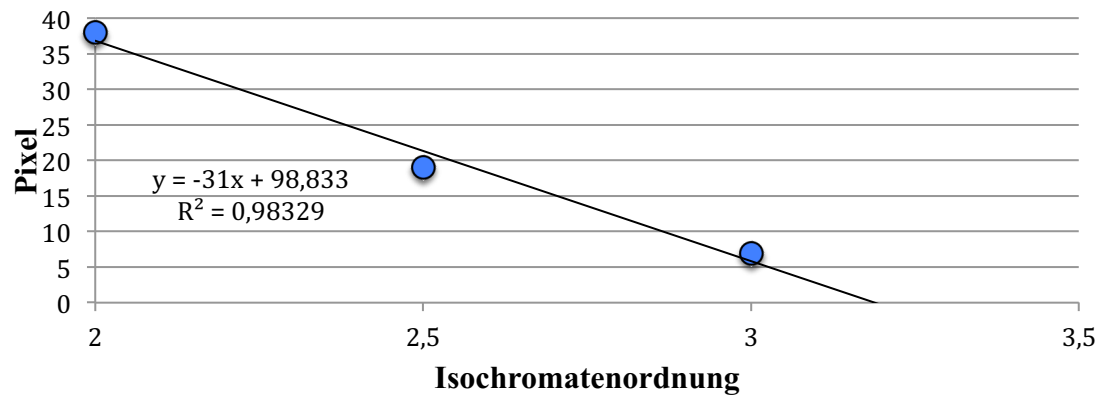


Abb. 3.2.4-4: grafische Darstellung der Isochromatenordnungen mit ihren jeweiligen Abständen zur Kavitätenwand aus Excel. Durch Extrapolation der linearen Regressionsgeraden lässt sich die an der Kavitätenwand vorliegende Isochromatenordnung annähernd bestimmen.

Um für jede Probe einen mittleren Spannungswert zu erhalten, wurde aus den ermittelten Spannungen an den drei Messstellen der Kavität das arithmetische Mittel berechnet. Wenn man diesen Wert der mittleren Isochromatenordnung gemäß den Eichversuchen von *Klinger* und *Nötzel* mit 2,34 MPa multipliziert [107], erhält man einen aussagekräftigen Spannungswert in MPa.

## **4 Reduktion der Spannungsentwicklung von Kompositfüllungen durch neue Methoden der Steuerung der Lichtpolymerisation**

### **4.1 Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe**

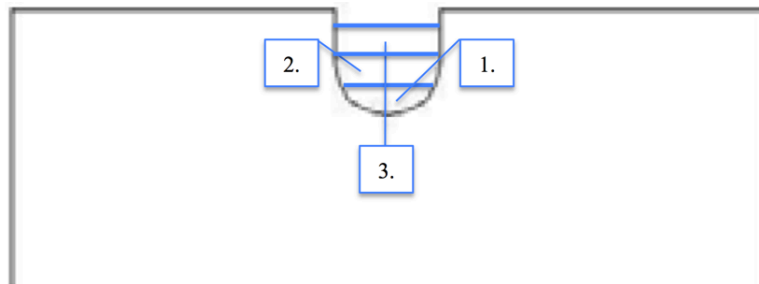
Zu Beginn der Vorversuche wurden Versuchskavitäten ( $n = 4$ ) mit der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangaben 4 mm hoch gefüllt und anschließend 60 s lichtgehärtet. Damit sollte ein Ausgangswert gebildet werden, der zum Vergleich mit allen anderen Methoden dienen sollte. Dabei kam zunächst das alte Bonding-Verfahren zum Einsatz, das jedoch vor allem bei Füllungsmethoden mit höheren Spannungswerten vermehrt zu Abrissen führte. In den Hauptversuchen wurde diese Versuchsreihe deshalb mit dem neuen Bonding-Verfahren wiederholt und als zuverlässiger Vergleichswert verwendet. Ziel war es, diese Spannungs-kraftwerte nach Möglichkeit durch neue Methoden zu verringern, ohne dass ein deutlicher Mehraufwand für den Behandler entsteht.

### **4.2 Schichttechnik mit verschiedenen Geometrien**

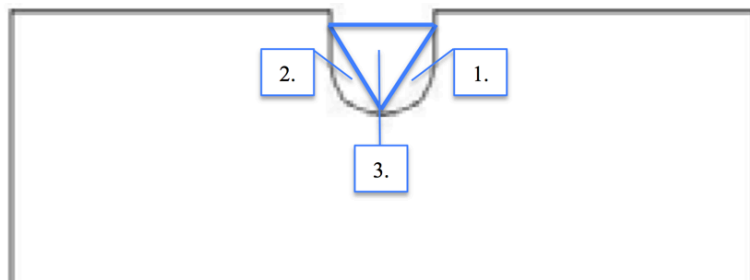
Die klassische Methode zur Reduktion von Spannungs-kraften ist die konventionelle Schicht- oder Inkrementtechnik. Dabei wird das Komposit in kleinen Inkrementen ( $< 2$  mm) in die Kavität eingebracht und jede Schicht separat lichtpolymerisiert. Es sollte herausgefunden werden, ob mit der Schichttechnik bei dem hier angewendeten Bulk-Fill Komposit Spannungsreduktionen zu erzielen sind und ob dabei die Schichtgeometrie einen Einfluss auf die Spannungs-kraften hat. Dazu wurden drei Versuchsreihen ( $n = 4$ ) mit verschiedenen Schichtgeometrien durchgeführt. Bei allen drei Versuchsreihen wurden die Versuchskavitäten mit drei etwa gleich großen Inkrementen aufgefüllt. Die erste und zweite Schicht wurde jeweils 20 s von oben lichtgehärtet, nach der dritten Schicht wurde abschließend 60 s von oben belichtet. Als Polymerisationslampe wurde die *Celalux 2* verwendet.

Bei der ersten Variante wurden die Kavitäten in drei waagerechte Schichten (jeweils ca. 1,7 mm) abgefüllt. Die Kavitäten der zweiten und dritten Variante wurden mit drei

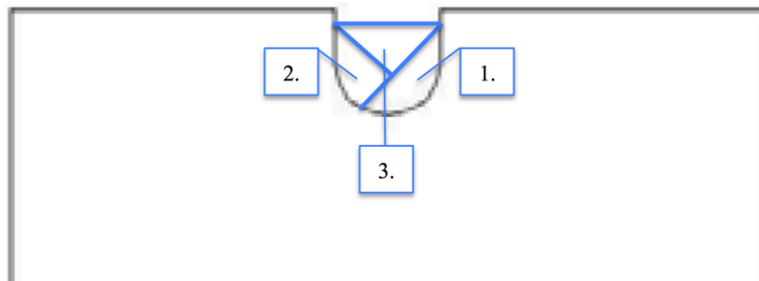
etwa gleich großen Inkrementen dreieckiger Form gefüllt, wobei sich die Anordnung der eingebrachten Inkremente zwischen den Varianten unterschied. Da bei diesen Versuchsreihen das alte Bonding-Verfahren angewendet wurde, führten wir abschließend zur Kontrolle eine Versuchreihe ( $n = 4$ ) mit dem neuen Bonding-Verfahren durch, bei der die Kavitäten genau wie bei der ersten Variante abgefüllt wurden.



*Abb. 4.2-1: Anordnung der drei Schichten bei der ersten Variante*



*Abb. 4.2-2: Anordnung der drei Schichten bei der zweiten Variante*



*Abb. 4.2-3: Anordnung der drei Schichten bei der dritten Variante*

#### 4.3 Vorversuche zur Ausgleichsschicht

Die Idee des Haftkomposits entstand aus der Überlegung, dass ein Komposit vom inneren Kern her zu den Kavitätenwänden aushärten muss, damit ein Teil der auftretenden Polymerisationsschrumpfung durch nachfließendes Material kompensiert werden kann. Wenn eine Kompositfüllung von innen nach außen aushärtet, wird das Komposit nicht wie üblich von der dem Licht zugewandten Oberfläche in die Tiefe fest. Es entsteht somit auch nicht initial ein geschlossener Raum, in dem kein Schrumpf durch nachfließendes Material mehr kompensiert werden könnte. Von der Theorie her erwartete man also einen ähnlichen Effekt, wie sowohl *Sommer und Gente* (2007) [127] als auch *Nötzel* (2008) [109] mit Lichtinserts erreichten. Außerdem führte dieser Effekt nachgewiesenermaßen zu einer Verbesserung der marginalen Integrität [117].

Zur Umsetzung gab es dabei in den Vorversuchen verschiedene Ansätze. Ein erster Versuch bestand darin, im Kern der Füllung ein Komposit mit einer höheren Lichtempfindlichkeit zu verwenden, als am Kavitätenrand. Der Ansatz wurde schnell wieder verworfen, da bereits unter Laborbedingungen keine deutliche Spannungsreduktion und kein zuverlässiger Haftverbund erzielt werden konnte. In einem zweiten Ansatz wurde im Kavitätenkern ein rein lichthärtendes und am Kavitätenrand ein rein chemisch härtendes Komposit verwendet. Damit war es zwar möglich, das Material im Kern absolut unabhängig von der sogenannten Ausgleichsschicht am Kavitätenrand auszuhärten. Man steht dabei als Behandler jedoch unter erheblichem Zeitdruck und weiß nie ganz genau, wann die chemische Aushärtung beginnt und wann sie vollständig abgeschlossen ist. Des Weiteren hatten wir bei den Versuchen sehr viele Abrisse zu verzeichnen, die entweder auf einem mangelhaften Verbund des autokatalytisch härtenden Komposits zum Bonding oder auf einer zu hohen Spannungsentwicklung dieses Komposits für die Haftkraft des verwendeten Bonding-Verfahrens beruhten. Wir sind der Ursache nicht weiter auf den Grund gegangen, stießen allerdings im Nachhinein auf ein ähnliches System der Firma Cumdente, bei dem in einem ersten Schritt die Kavitätenwände nach dem Ätzen und Bonden mit einer dünnen Schicht des lichthärtenden Komposits *Relaxx Flow* (Cumdente GmbH, Tübingen, Deutschland) benetzt werden. Im zweiten Schritt wird die restliche Kavität mit dem rein chemisch aushärtenden Komposit *Clear Paste* (Cumdente GmbH, Tübingen, Deutschland) aufgefüllt.

Nach zwei Minuten Aushärtungszeit wird dann im letzten Schritt das Relaxx Flow 40 s lichtpolymerisiert. *Albrecht* (2014) konnte für das System von Cumdente nachweisen, dass es der Inkrementtechnik im Hinblick auf die Verbundstärke und die Randdichtigkeit deutlich unterlegen ist [118]. Außerdem führen die zwei Minuten Aushärtungszeit des autokatalytisch härtenden Komposits *Clear Paste* zu einem deutlich gesteigerten Zeitaufwand für den Behandler. Insgesamt konnte mit diesem zweiten Ansatz zwar eine Spannungsreduktion erzielt werden, was die Idee stützte. Jedoch verfolgten wir aufgrund der vielen Abrisse und des gesteigerten Zeitaufwandes den Ansatz mit autokatalytisch härtenden Kompositen nicht weiter.

Anstatt dessen verwendeten wir im dritten und entscheidenden Ansatz sowohl für die Ausgleichsschicht, als auch für den Kavitätenkern lichthärtende Komposite. Die Komposite enthielten dabei verschiedene Photoinitiatoren mit unterschiedlichen Absorptionsspektren, wodurch sie mit einer speziellen Lampe unabhängig voneinander ausgehärtet werden konnten. Für die Ausgleichsschicht stellte die Firma VOCO (Cuxhaven, Deutschland) ein *Exp. Heavy Flow* mit dem Photoinitiator *Lucirin® TPO* (V54186) zur Verfügung. Für den Kavitätenkern wurde *x-tra base* der Farbe A2 (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) verwendet. Die Kavitätenwände benetzte man dann, dem „Lining“ der Inkrementtechnik entsprechend, mit dem *Exp. Heavy Flow*. Ohne diese Schicht auszuhärten, füllte man im Anschluss das restliche Kavitätenvolumen mit herkömmlichem *x-tra base* auf. Daraufhin wurde mit einer *Celalux 2* LED-Lampe (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) durch einen LEE Filter 124 Dark Green (LEE Filters, Andover, UK) versucht, vorerst nur den Kavitätenkern 60 s von oben und jeweils 20 s von den Seiten auszuhärten. Mithilfe des Filters wurde dabei versucht, die Wellenlängenbereiche auszublenden, die den Photoinitiator *Lucirin® TPO* aktivieren und somit die Ausgleichsschicht aushärten würden (siehe Abb. 4.3-1).

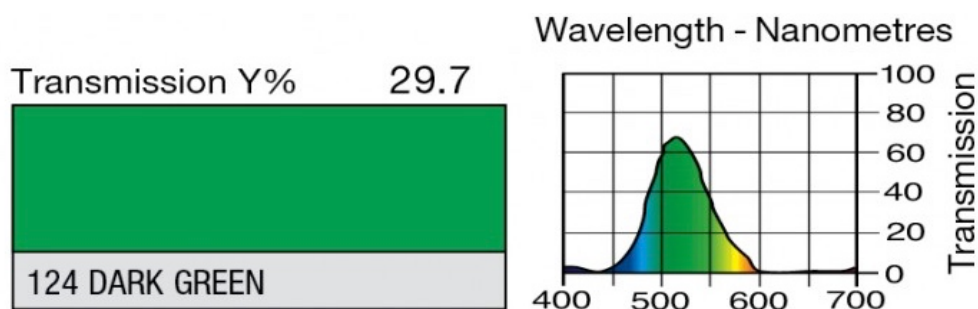


Abb. 4.3-1: Transmissionsrate verschiedener Wellenlängen des LEE Filters 124 Dark Green [119]

Abschließend wurde die Ausgleichsschicht mit der Halogenlampe *Translux CL* (Heraeus Kulzer, Bad Sachsa, Deutschland), deren breitbandiges Spektrum zu einer adäquaten Aktivierung von *Lucirin® TPO* ausreicht, jeweils 20 s von drei Seiten ausgehärtet.

#### 4.4 Entwicklung der neuen Polymerisationslampe

Die Aushärtungsmethode mit dem LEE Filter und verschiedenen Polymerisationslampen erwies sich als sehr umständlich, unzuverlässig und nicht praxistauglich. Des Weiteren zeigte sich, dass es trotz der Belichtung durch den Filter zu einer geringfügigen Aktivierung des *Lucirin® TPO* kam. Diese Tatsachen gaben Anlass zum Entwurf eines praxistauglichen Prototypen einer Polymerisationslampe mit zwei LEDs, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Die neue Lampe mit verschiedenen Wellenlängenbereichen machte es nun möglich, die in den Versuchskompositen enthaltenen Photoinitiatoren Kampferchinon und *Lucirin® TPO* unabhängig voneinander und praxistauglich zu aktivieren.

#### 4.5 Vorversuche zur Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung

Ein weiterer Ansatz, der durch die neue Möglichkeit der Lichtpolymerisationssteuerung möglich wurde, entstand in Anlehnung an die Versuche zur Vorbelichtung von *Dudda (2014) [45]*. Die Überlegung dabei war, den Übergangszustand des 4-Phasen-Modells (siehe Abb. 2.1.3-2) im Komposit nicht wie *Dudda* mechanisch herbeizuführen, sondern chemisch. Dazu musste ein Komposit hergestellt werden, das die beiden Photoinitiatoren Kampferchinon und *Lucirin® TPO* in einem ganz bestimmten Mischungsverhältnis enthält. Die Konzentration des einen Photoinitiators muss dabei so gering sein, dass es durch seine separate Aktivierung nicht zur vollständigen Polymerisation des Komposits kommen kann. Nach Möglichkeit sollte beim Aktivieren dieses Initiators nur der Übergangszustand erreicht werden. Die Konzentration des anderen



Photoinitiators im Komposit muss so hoch sein, dass bei seiner Aktivierung eine ausreichende Polymerisation des Materials gewährleistet ist.

Zur Herstellung dieser Kompositmischungen fertigte uns die Firma VOCO (Cuxhaven, Deutschland) freundlicherweise eine Variante ihres Bulk-Fill-Flowables *x-tra base* an, in der lediglich das Photoinitiatorsystem Kampferchinon gegen *Lucirin® TPO* ausgetauscht wurde. Um Mischungen der beiden Kompositvarianten mit verschiedenen definierten Mischungsverhältnissen zu erhalten, wurden die Mengenteile der Komposite mit der Analysenwaage Sartorius LE 225D-0CE (Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) abgewogen und deren Anteil in Gew.-% an der jeweiligen Mischung bestimmt. Anhand des Anteils in Gew.-% und den bekannten Konzentrationen der Photoinitiatoren in beiden *x-tra base* Varianten, konnte man dann die prozentualen Konzentrationen der beiden Initiatoren in jeder Mischung bestimmen. Abschließend wurden die gewogenen Anteile beider *x-tra base* Varianten mit einem kleinem Spatel auf dem Lichtblock sorgfältig vermischt, in leere Komposit-Compulen gefüllt und beschriftet.

Zuerst wurden zu definierten Mengen des *x-tra base* mit *Lucirin® TPO* verschiedene definierte kleine Mengen des handelsüblichen *x-tra base* mit Kampferchinon gegeben. Dabei entstanden Komposite mit geringem Kampferchinon- und hohem *Lucirin® TPO*-Anteil. Im Folgenden musste anhand dieser Mischungen nun ermittelt werden, welche Konzentration des Kampferchinons in einer *x-tra base* Mischung notwendig ist, um das Komposit bei Belichtung mit der neuen Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus zwar in einen Übergangszustand zu versetzen, jedoch keine vollständige Polymerisation hervorzurufen. Dasselbe musste für den Photoinitiator *Lucirin® TPO* ermittelt werden, wenn dieser mit der neuen Polymerisationslampe im violetten Licht-Modus belichtet wird. Dafür wurden Kompositmischungen mit umgekehrten Photoinitiatorkonzentrationen angefertigt, bei denen der *Lucirin® TPO*-Anteil gering und der Kampferchinonanteil hoch war.

Alle angefertigten Mischungen wurden mit der akustischen Messmethode nach *Althaus und Gente* untersucht [120]. Bei dieser Messvorrichtung sind zwei Lautsprecher über einen Metallstab und eine Glasplatte mit einer darauf applizierten Kompositprobe miteinander verbunden. Ein Frequenzgenerator bringt die Membran des ersten Lautsprechers durch sinusförmige Wechselspannung in Schwingung. Die Schwingung wird

dann über den Metallstab und das zunehmend härter werdende Komposit auf die Glasplatte und somit auf den zweiten Lautsprecher übertragen, der als Mikrofon betrieben wird. Die Mikrofonspannung wird mit einem Millivoltmeter gemessen und mittels x-t-Schreiber aufgezeichnet. Je nach Zustand des Komposits verändert sich dabei die Spannung, bis sie beim Eintreten der Endhärte letztendlich konstant bleibt [120].

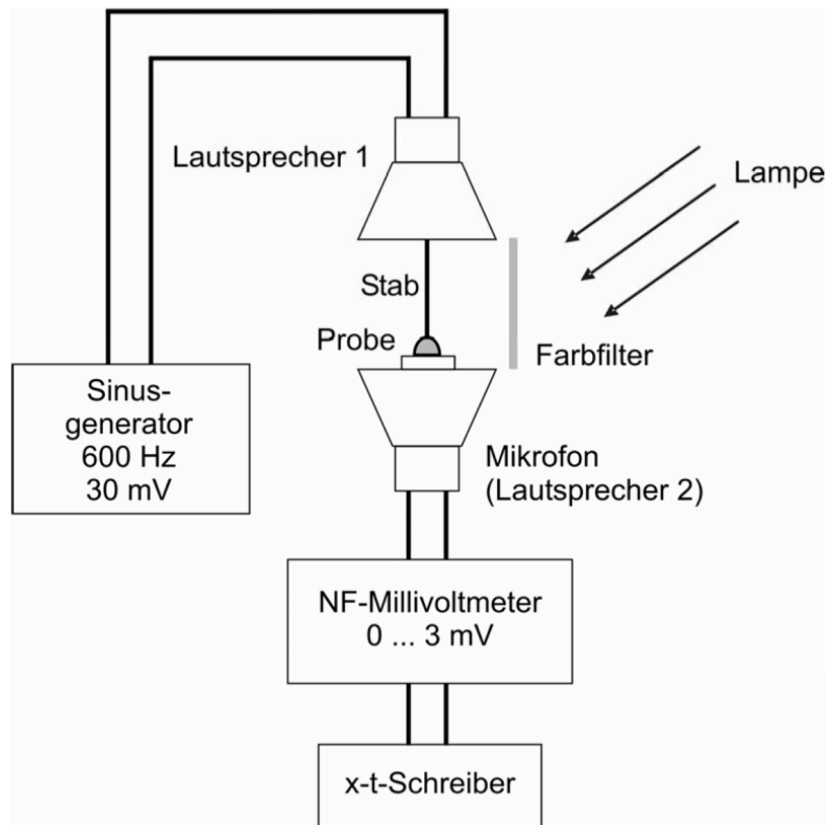


Abb. 4.5-1: schematischer Aufbau des akustischen Messsystems (aus Dissertation Althaus, 2008 [120])

Mit dem Messsystem wurde also nach der jeweiligen Mischungsvariante gesucht, bei der sich keine konstante Spannung einstellt, da keine vollständige Polymerisation erfolgt ist. Dennoch sollte das Komposit bei blauer bzw. violetter Belichtung vom fließfähigen in den kriechfähigen Zustand übergegangen sein. Die dabei ermittelten Kompositmischungen mit den entsprechenden Konzentrationsverhältnissen beider Photoinitiatoren dienten in den Folgeversuchen als Versuchskomposite. Die Mischung mit geringem Kampferchinon- und hohem *Lucirin® TPO*-Anteil wurde für die Ausgleichsschicht und bei der Bulk-Fill Technik mit blauer Vorhärtung verwendet, wohingegen die Mischung mit geringem *Lucirin® TPO*-Anteil und hohem Kampferchinon-

Anteil bei der Bulk-Fill Technik mit violetter Vorhärtung und der exemplarischen Schichtfüllung mit Vorhärtung zur Anwendung kam.

#### 4.6 Direktes Kompositinlay mit Ausgleichsschicht

Mit der neuen Kompositmischung, einem herkömmlichen Bulk-Fill-Flowable und der neuen Polymerisationslampe war es nun möglich, eine Art „direktes Kompositinlay“ in der Kavität herzustellen, ohne dabei vom Konzept der Minimalinvasivität abweichen zu müssen. In den dazugehörigen Vorversuchen aus Kapitel 4.3 verwendeten wir für die Ausgleichsschicht das Exp. Heavy Flow mit dem Photoinitiator *Lucirin® TPO* (V54186). Dieses wurde beim Füllen des Kavitätenkerns im fließfähigen Zustand belassen, da man es

nicht gezielt in einen Übergangszustand versetzen, sondern ausschließlich mit violettem Licht vollständig aushärten konnte. Aufgrund der fließfähigen Eigenschaften des Exp. Heavy Flows bestand deshalb die Gefahr, dass die dünne Ausgleichsschicht beim Befüllen des Kavitätenkerns in

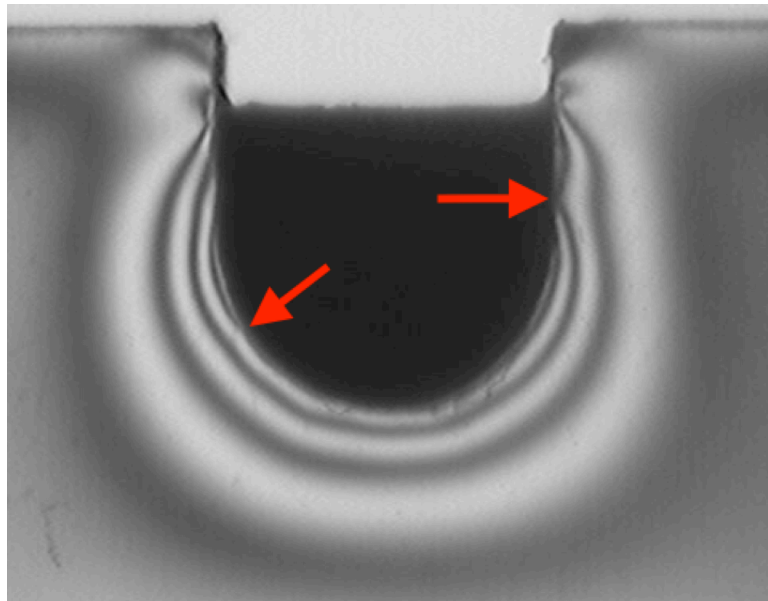


Abb. 4.6-1: *punktueller Abriss durch vollständiges Verdrängen der Ausgleichsschicht*

manchen Bereichen vollständig vom herkömmlichen *x-tra base* verdrängt wird, wodurch es zu punktuellen Abrissen kommen würde. Unter *in vitro* Bedingungen waren diese punktuellen Abrisse bei einigen Vorversuchen erkennbar (siehe Abb. 4.6-1), ließen sich jedoch mit viel Sorgfalt und Vorsicht beim Befüllen des Kavitätenkerns vermeiden.

Da punktueller Abriss die Qualität und Langlebigkeit von Kompositfüllungen deutlich

vermindern und eine vollständige Verdrängung der Ausgleichsschicht bei der Anwendung am Patienten in keiner Weise garantiert werden kann, erwies sich das Verfahren in dieser Weise als nicht praxistauglich. Des Weiteren lässt sich ein geringfügiges Vermischen der beiden Kompositvarianten an deren Grenzfläche nicht vermeiden.

Aus diesen Gründen nutzten wir für die Ausgleichsschicht anschließend einige der ermittelten Kompositmischungen aus Kapitel 4.5. Da die verwendeten Mischungen geringe Mengen Kampferchinon und hohe Mengen *Lucirin® TPO* enthielten, konnte man sie nach dem Bonding dünn auf die Kavitätswände auftragen und mit dem Blaulicht-Modus der neuen Polymerisationslampe gezielt in den noch kriechfähigen Übergangszustand versetzen. Es wurden sechs verschiedene Kompositmischungen untersucht, die verschieden hohe Anteile von *x-tra base* mit Kampferchinon und *x-tra base* mit *Lucirin® TPO* enthielten. Der Anteil von *x-tra base* mit Kampferchinon der sechs Einzelmischungen betrug dabei 3 Gew.-%, 4 Gew.-%, 5 Gew.-%, 6 Gew.-%, 7 Gew.-%, 8 Gew.-%. Es ergibt sich daraus ein Mittelwert von 5,5 Gew.-%. Den restlichen Anteil am Kompositgemisch bildete jeweils *x-tra base* mit *Lucirin® TPO*. Zu jeder Mischung wurde dabei nur ein Versuch durchgeführt, da unsere Möglichkeiten zum Anfertigen der Mischungen sehr begrenzt waren und die letztendlich errechneten Mengen der beiden Photoinitiatoren nur sehr geringfügig variierten. Aus den sechs Messwerten wurde dann ein Spannungsmittelwert errechnet.

Zur Vorhärtung der Ausgleichsschicht wählten wir Belichtungszeiten von 10 s bzw. 20 s. Zwischen diesen beiden waren nahezu keine Unterschiede festzustellen und höhere Belichtungszeiten zeigten in Vorversuchen auch keine weitere Verbesserung der Ergebnisse. Das Material war nun nicht mehr fließfähig und ließ sich somit auch nicht mehr verdrängen, weswegen man im Anschluss gefahrlos die restliche Kavität mit herkömmlichem *x-tra base* auffüllen konnte. Der Kern wurde dann mit der neuen Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus 40 s lichtpolymerisiert. Die Ausgleichsschicht wurde dadurch nicht weiter ausgehärtet. Man konnte jedoch in den entsprechenden spannungsoptischen Messvideos deutlich erkennen, wie die Ausgleichsschicht den entstehenden Schrumpf des Komposits im Kavitätenkern durch „Kriechen“ langsam kompensierte. Wenn man der Ausgleichsschicht nach dem Aushärten des Kavitätenkerns noch 30 s – 60 s Zeit zum „Kriechen“ gab, verbesserten sich die Ergebnisse noch weiter. Der entstandene Schrumpf des Komposits im Kavitätenkern wurde nach

dieser Zeit meist nahezu vollständig kompensiert.

Abschließend wurde die Ausgleichsschicht mit der neuen Polymerisationslampe im violetten Licht-Modus 80 s ausgehärtet.

#### 4.7 Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung

Die nächste Überlegung bestand darin, Kavitäten mit einigen der Kompositmischungen aus Kapitel 4.5 nach der Bulk-Technik zu füllen und sie dann durch entsprechende Vorbelichtung erst möglichst vollständig in den kriechfähigen Übergangszustand zu versetzen, bevor man sie abschließend endhärtet. Insgesamt wurden sieben unterschiedliche Kompositmischungen verwendet, die verschieden hohe Anteile von *x-tra base* mit Kampferchinon und *x-tra base* mit Lucirin® TPO enthielten. Der Anteil von *x-tra base* mit Kampferchinon an den Einzelmischungen betrug 10 Gew.-%, 12 Gew.-%, 14 Gew.-%, 16 Gew.-%, 18 Gew.-%, 20 Gew.-%, 22 Gew.-%, 16 Gew.-%, was einen Mittelwert von 16 Gew.-% ergibt. Den restlichen Anteil bildete jeweils *x-tra base* mit Lucirin® TPO. Alle Mischungen wurden mit der neuen Polymerisationslampe zuerst im Blaulicht-Modus 160 s vor- und danach im violettem Licht-Modus 80 s endgehärtet. Auch in dieser Versuchsreihe wurde zu jeder Mischung nur ein Versuch durchgeführt, da unsere Möglichkeiten zum Anfertigen der Mischungen sehr begrenzt waren und die letztendlich errechneten Mengen der Photoinitiatoren nur sehr geringfügig variierten. Aus den sieben Messwerten wurde dann ein Spannungsmittelwert errechnet.

Nachdem jetzt ein passendes Mischungsverhältnis gefunden war, kehrten wir die Massenanteile der Komposite und die Belichtungsreihenfolge um. Es wurde eine Versuchsreihe ( $n = 4$ ) mit einer Kompositmischung durchgeführt, die 16 Gew.-% *x-tra base* mit Lucirin® TPO und 84 Gew.-% *x-tra base* mit Kampferchinon enthielt. Diese Mischung wurde 80 s mit der neuen Polymerisationslampe im violetten Licht-Modus vor- und 80 s im blauen Licht-Modus endgehärtet.

#### 4.8 Schichttechnik mit Vorhärtung

Im Anschluss an alle anderen Versuchsreihen stellte sich die Frage, ob man durch die Methode der Vorhärtung auch die Spannungswerte bei der konventionellen Schichttechnik verringern kann. Dazu wurde jedoch lediglich ein orientierender Versuch als Vision mit der Kompositmischung durchgeführt, die 16 Gew.-% *x-tra base* mit *Lucirin® TPO* und 84 Gew.-% *x-tra base* mit Kampferchinon enthielt. Die Versuchskavitäten füllte man dabei in drei horizontalen Schichten von ca. 1,7 mm insgesamt 4 mm hoch ab. Nach jeder Schicht wurde mit der neuen Polymerisationslampe erst 20 s im violettem Licht-Modus und dann 20 s im Blaulicht-Modus lichtgehärtet und abschließend 40 s im Blaulicht-Modus nachgehärtet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Spannungen bei der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe

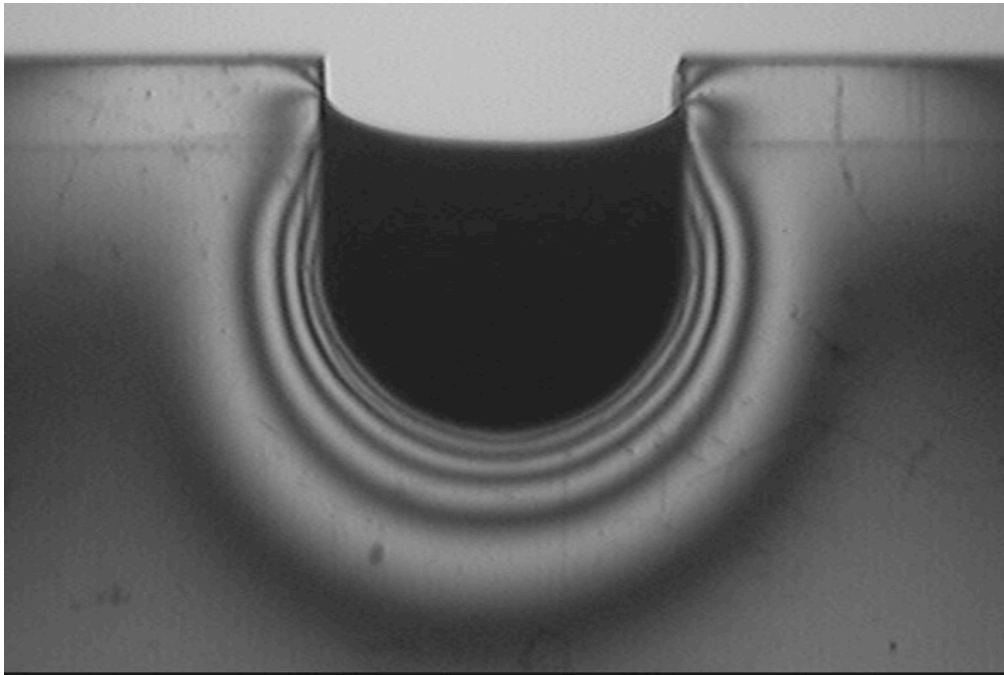


Abb. 5.1-1: optisches Spannungsbild einer Bulk-Fill Füllung mit x-tra base nach 1000 s bei Verwendung des alten Bonding-Verfahrens (Versuch „SF8“)

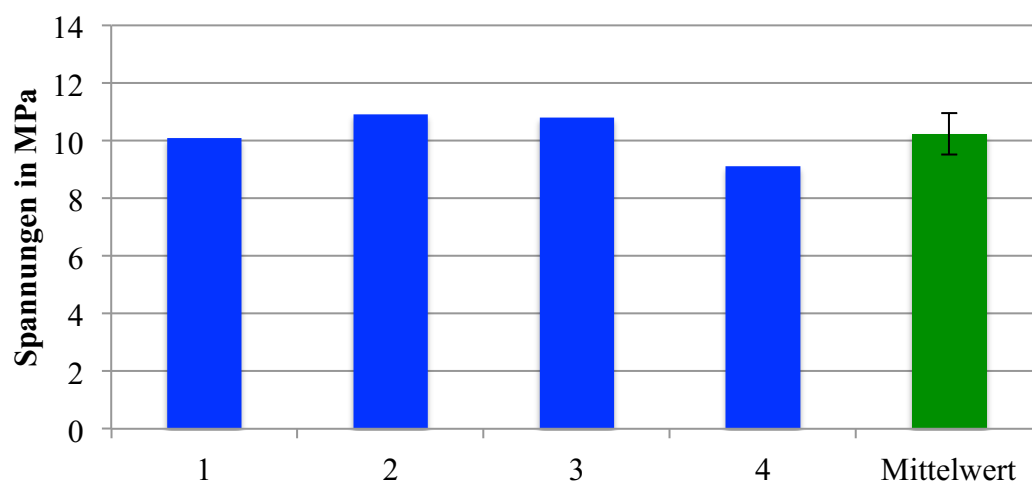


Abb. 5.1-2: Spannungen bei Anwendung der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangaben in MPa nach 1000 s bei Verwendung des alten Bonding-Verfahrens.

Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).

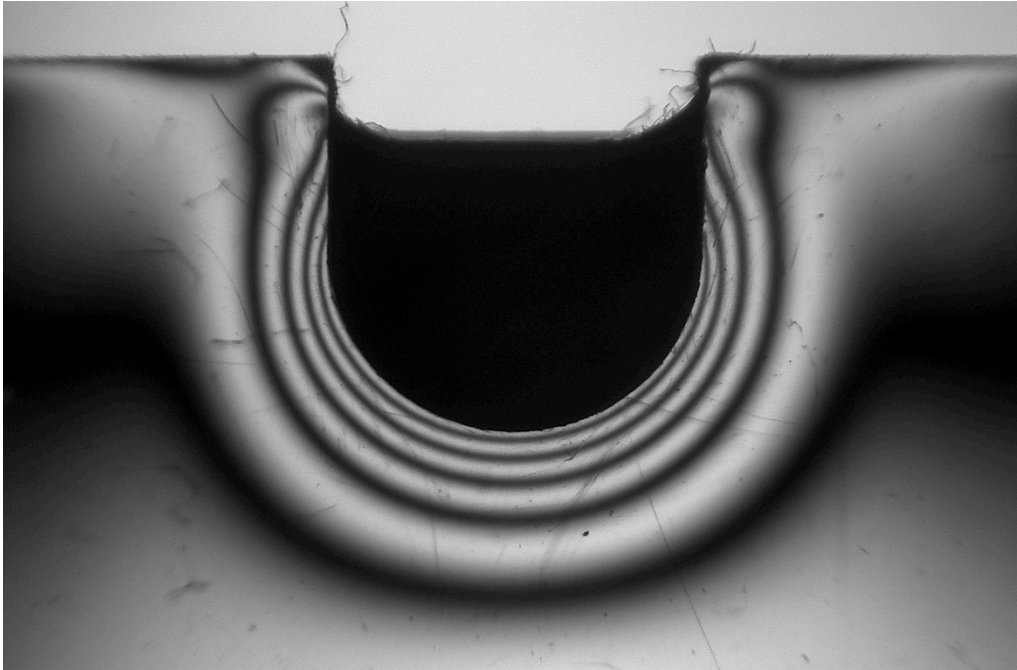


Abb. 5.1-3: optisches Spannungsbild einer Bulk-Fill Füllung mit x-tra base nach 1000 s bei Verwendung des neuen Bonding-Verfahrens (Versuch „BN1“)

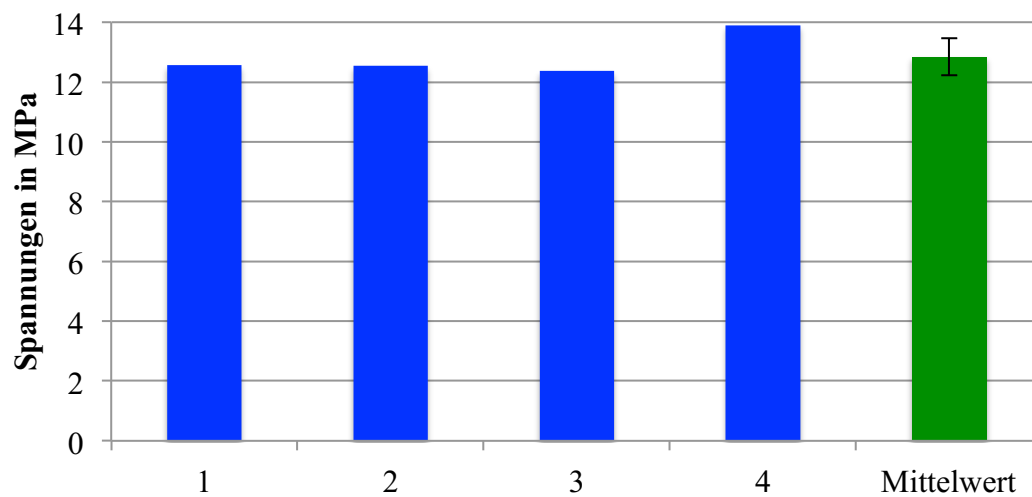


Abb. 5.1-4: Spannungen bei Anwendung der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangaben in MPa nach 1000 s bei Verwendung des neuen Bonding-Verfahrens. Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).



## 5.2 Spannungen bei der Schichttechnik verschiedener Geometrien

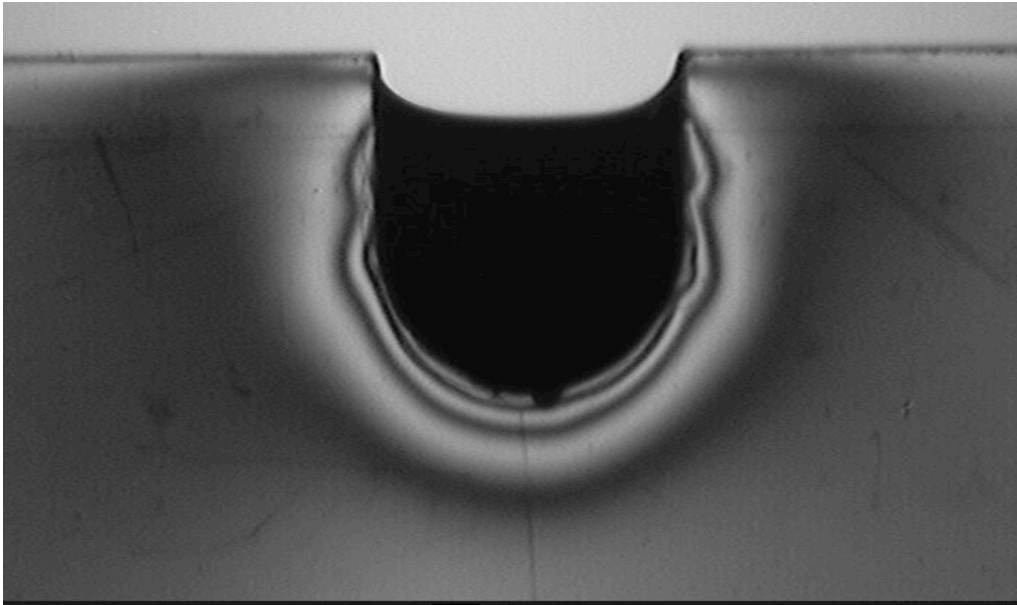


Abb. 5.2-1: optisches Spannungsbild einer Schichtfüllung der Variante 1 nach 1000 s  
(Versuch „SF4“)

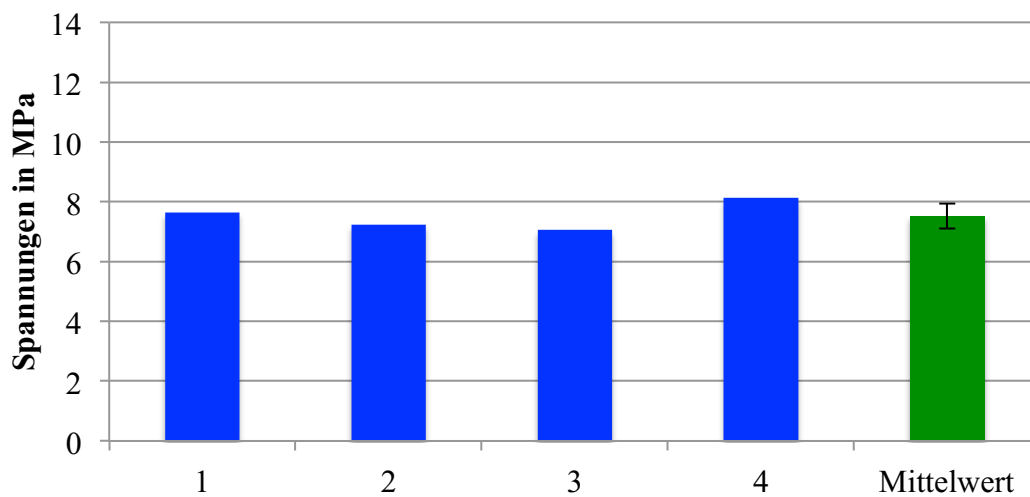


Abb. 5.2-2: Spannungen bei Anwendung der Variante 1 in MPa nach 1000 s.  
Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).

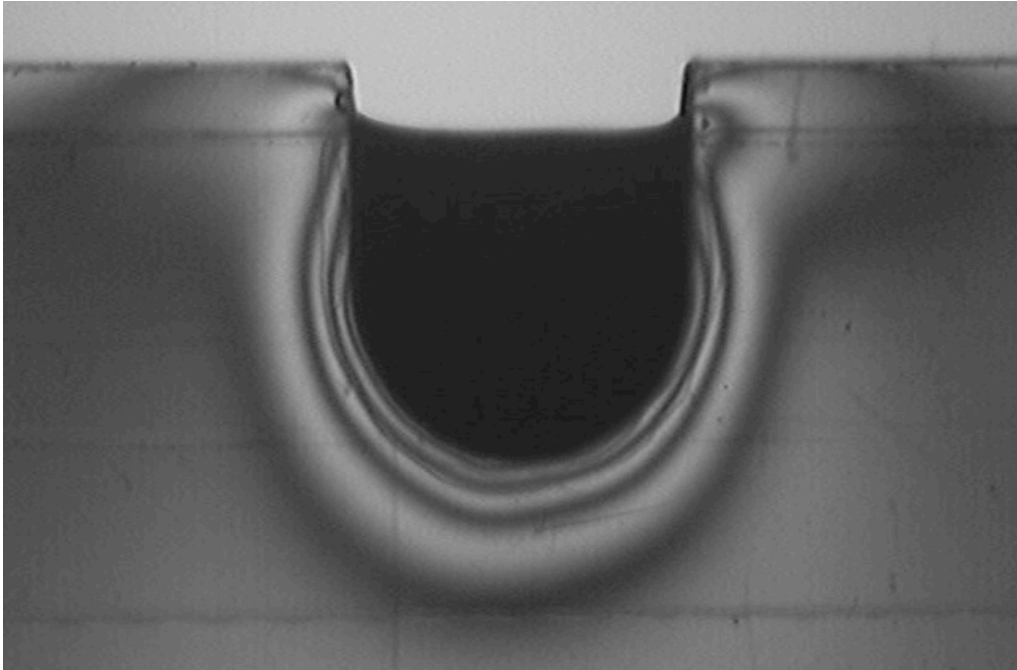


Abb. 5.2-3: optisches Spannungsbild einer Schichtfüllung der Variante 2 nach 1000 s  
(Versuch „SF9“)

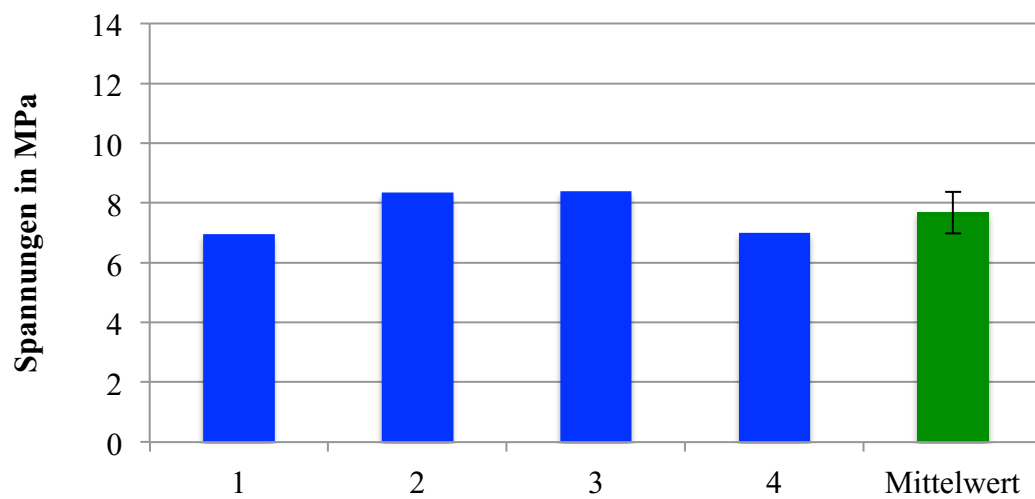


Abb. 5.2-4: Spannungen bei Anwendung der Variante 2 in MPa nach 1000 s.  
Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).

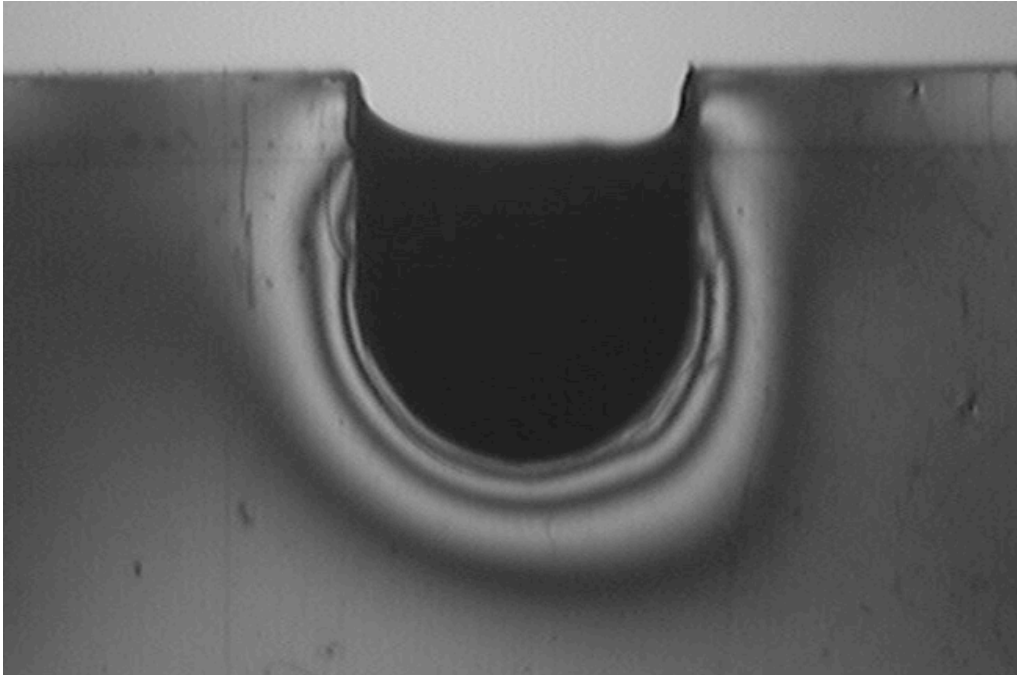


Abb. 5.2-5: optisches Spannungsbild einer Schichtfüllung der Variante 3 nach 1000 s  
(Versuch „SF12“)

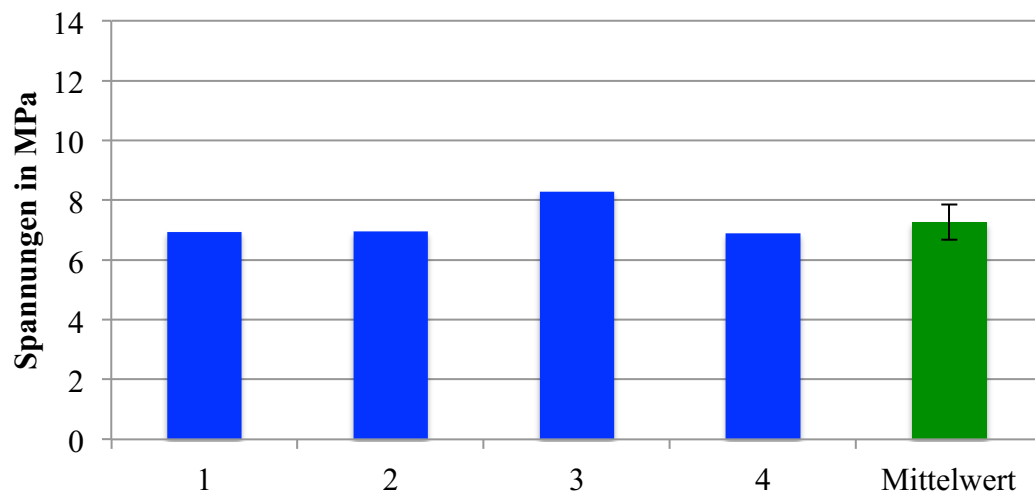
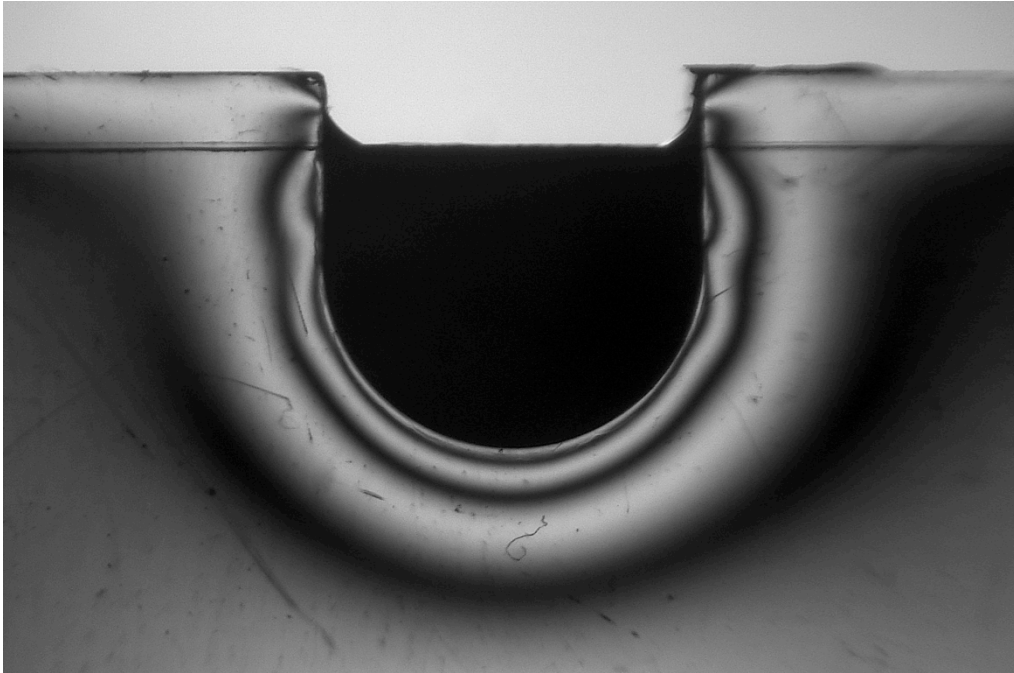
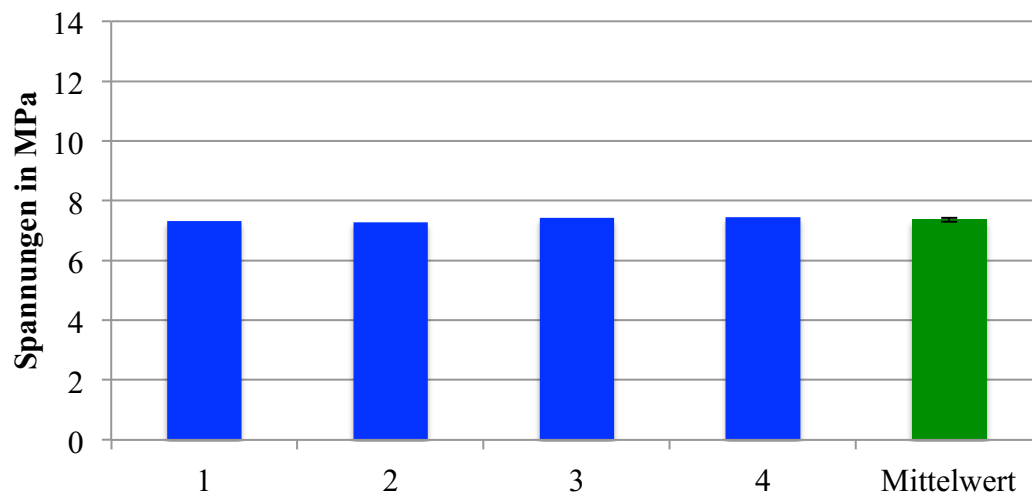


Abb. 5.2-6: Spannungen bei Anwendung der Variante 3 in MPa nach 1000 s.  
Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).



*Abb. 5.2-1: optisches Spannungsbild einer Schichtfüllung der Variante 1 nach 1000 s  
bei Verwendung des neuen Bonding-Verfahrens (Versuch „SFN2“)*



*Abb. 5.2-8: Spannungen bei Anwendung der Variante 1 in MPa nach 1000 s  
bei Verwendung des neuen Bonding-Verfahrens.*

*Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).*

### 5.3 Spannungen beim direkten Kompositinlay mit Ausgleichsschicht

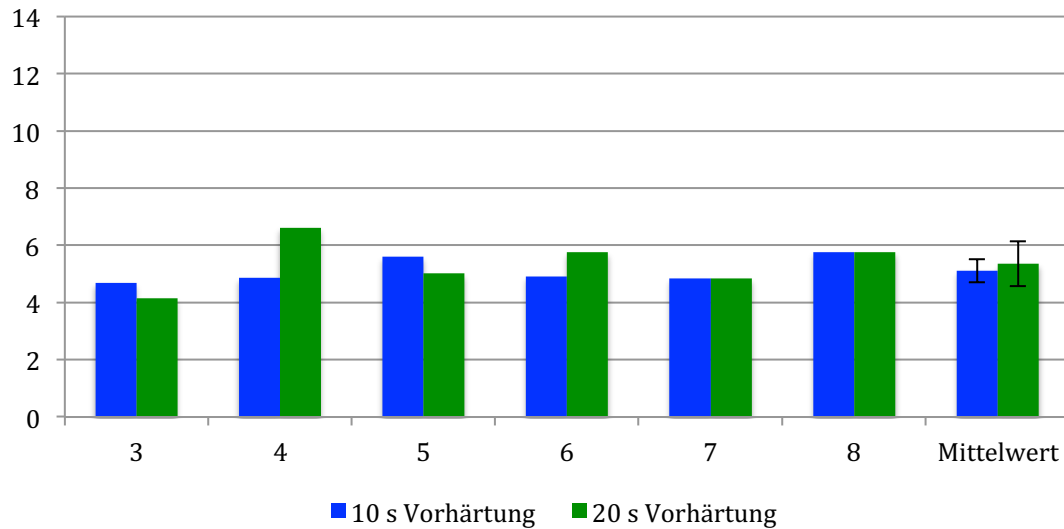


Abb. 5.3-1: Spannungswerte der verschiedenen Kompositmischungen in MPa nach 1000 s bei 10 s (blau) bzw. 20 s (grün) Vorhärtung der Ausgleichsschicht mit der neuen Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus.

### 5.4 Spannungen bei der Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung

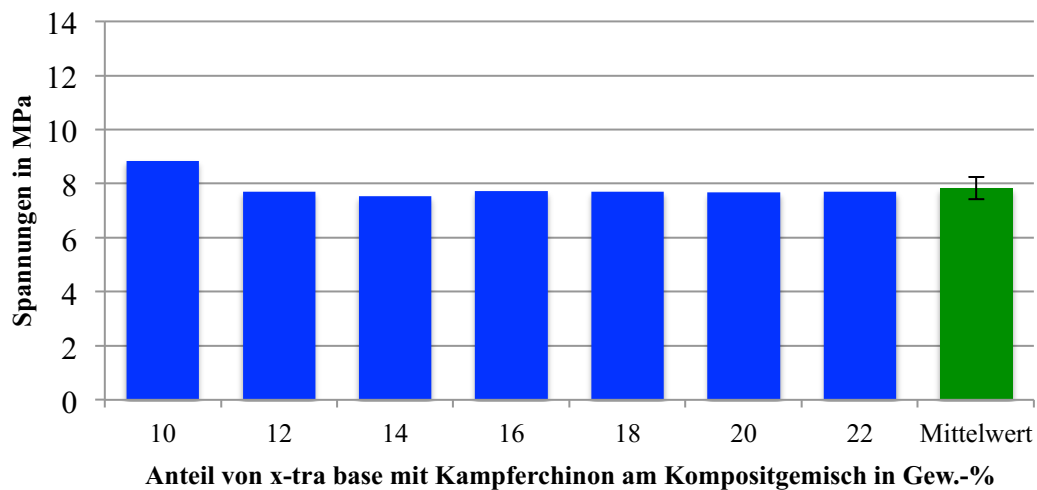


Abb. 5.4-1: Spannungswerte der verschiedenen Kompositmischungen und deren Mittelwert in MPa nach 1000 s bei 160 s Vorhärtung mit der neuen Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus und 80 s Endhärtung im violettem Licht-Modus. Dargestellt sind die sieben Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).

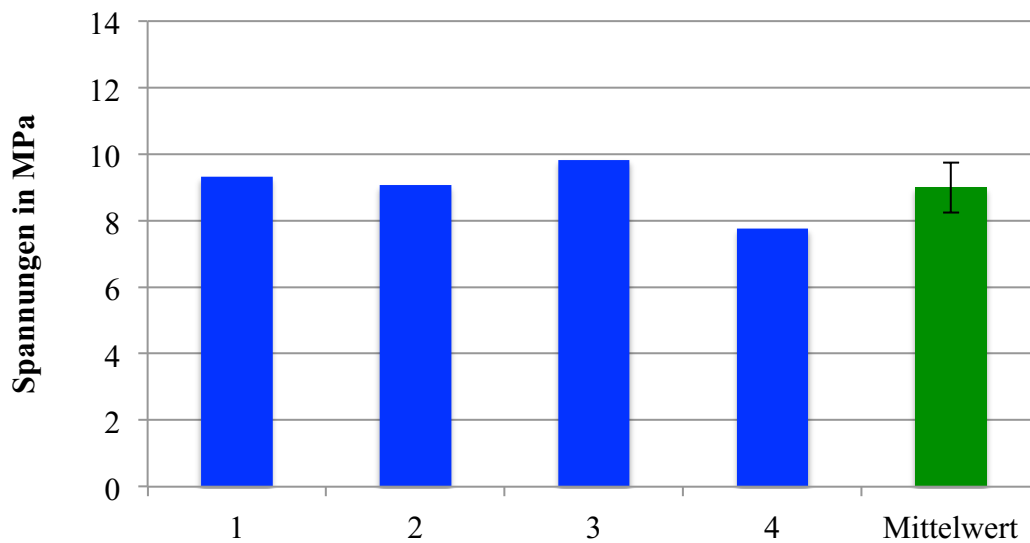


Abb. 5.4-2: Spannungswerte des Kompositgemisches aus 16 Gew.-% x-tra base mit Lucirin® TPO und 84 Gew.-% x-tra base mit Kampferchinon in MPa nach 1000 s bei 80 s Vorhärtung mit der neuen Polymerisationslampe im violettem Licht-Modus und 80 s Endhärtung im Blaulicht-Modus. Dargestellt sind die vier Einzelmesswerte (blau) und deren Mittelwert (grün).

## 5.5 Spannungen bei der Schichttechnik mit Vorhärtung

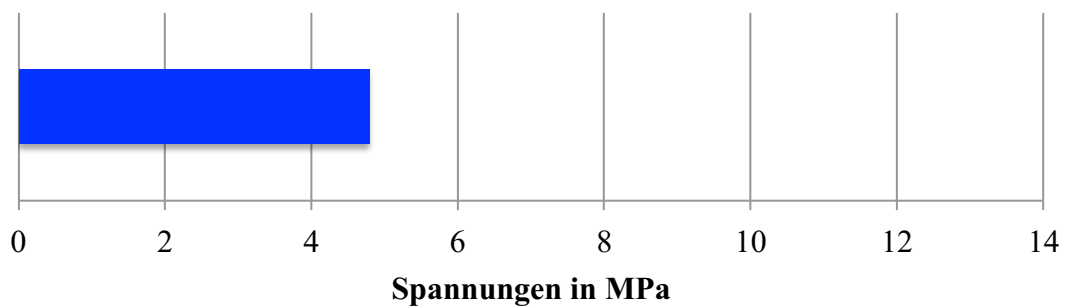


Abb. 5.5-1: Spannungswert einer exemplarischen Schichtfüllung bei Verwendung des Kompositgemisches aus 16 Gew.-% x-tra base mit Lucirin® TPO und 84 Gew.-% x-tra base mit Kampferchinon in MPa nach 1000 s. Nach jeder Schicht wurde jeweils erst 20 s mit der neuen Polymerisationslampe im violettem Licht-Modus und dann 20 s im Blaulicht-Modus belichtet. Nach der letzten Schicht wurde zusätzlich 40 s im Blaulicht-Modus gehärtet.

### 5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und statistische Auswertung

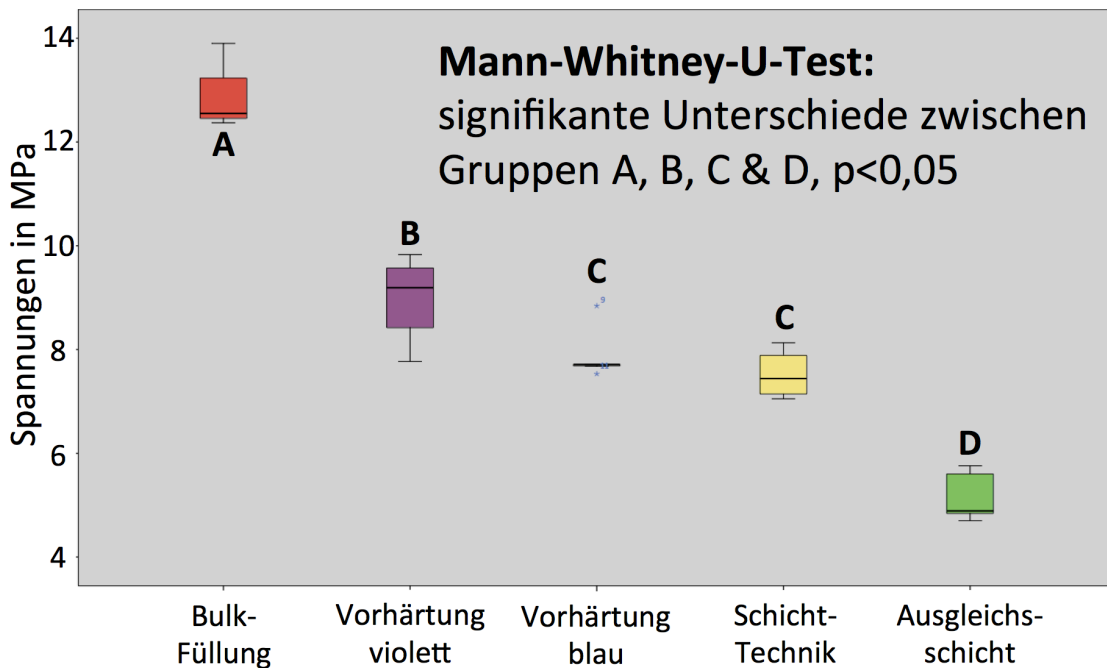


Abb. 5.6-1: Verteilung der schrumpfungsbedingten Spannungen der verschiedenen Methoden in MPa nach 1000 s im Boxplot-Diagramm.

Während der Experimente konnten folgende 5 Hypothesen aufgestellt werden:

1. Die Schrumpfungsspannungen der verschiedenen Methoden unterscheiden sich nicht signifikant.
2. Die konventionelle Schichttechnik beeinflusst die Schrumpfungsspannungen im Vergleich zur Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe nicht.
3. Die Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung durch die neue Polymerisationslampe im violetten Licht-Modus oder im Blaulicht-Modus bei Verwendung einer speziell dafür geeigneten Kompositmischung beeinflusst die Schrumpfungsspannungen im Vergleich zur Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe und zur konventionellen Schichttechnik nicht.
4. Die Methode der Ausgleichsschicht beeinflusst die Schrumpfungsspannungen im Vergleich zur Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe und zur konventionellen Schichttechnik nicht.
5. Die Methode der Ausgleichsschicht beeinflusst die Schrumpfungsspannungen im Vergleich zur Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung durch die neue Polymerisations-

lampe im violetten Licht-Modus oder im Blaulicht-Modus bei Verwendung einer speziell dafür geeigneten Kompositmischung nicht.

Die statistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS (Version 22) durchgeführt. Zuerst erfolgte die Analyse der Daten auf Normalverteilung anhand des Kolmogorov-Smirnov Tests. Diese lag für eine der Gruppen nicht vor, weshalb parametrische Testverfahren nicht angewendet werden konnten. Stattdessen wurde zunächst der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test durchgeführt, mit dem die erste Hypothese auf sehr hohem Signifikanzniveau verworfen werden musste ( $p < 0,001$ ). Mit dem Kruskal-Wallis-Test wurde jedoch nur ermittelt, dass überhaupt signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Methoden bestehen. Um herauszufinden, zwischen welchen Methoden die signifikanten Unterschiede bestehen, mussten als nächstes Paarvergleichstests durchgeführt werden. Alle möglichen Paarungen wurden durch wiederholte Analyse mittels Mann-Whitney-U-Tests analysiert. Anhand dieser Tests mussten die Hypothesen zwei, vier und fünf auf hohem Signifikanzniveau ( $p < 0,05$ ) verworfen werden. Lediglich ein Teil der dritten Hypothese konnte nicht abgelehnt werden, da zwischen der Bulk-Fill Technik mit Vorhärtung durch die neue Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus bei Verwendung einer speziell dafür geeigneten Kompositmischung und der konventionellen Schichttechnik keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Schrumpfungsspannungen ermittelt werden konnten ( $p < 0,05$ ).



## 6 Diskussion

### 6.1 Diskussion der Methoden

Die in dieser Arbeit verwendete spannungsoptische Messmethode hat sich über viele Jahre bewährt und wurde in diversen vorangegangenen Dissertationen verwendet und weiterentwickelt (*Klingler* (2004) [107], *Nötzel* (2008) [109], *Dudda* (2014) [45], *Sultan* (2015) [121]). Des Weiteren sahen auch andere Autoren im spannungsoptischen Messverfahren eine geeignete Methode zur Spannungsmessung von Kompositmaterialien und nutzten das Verfahren in diversen Publikationen [51, 69, 71, 85, 114, 122, 123, 124]. Die absoluten Werte der in unserer Arbeit gemessenen Spannungen lassen sich jedoch nicht mit den Herstellerangaben und anderen Literaturwerten vergleichen, da hier andere Prüfkörper und Geometrien verwendet werden. Deshalb wurde zu Beginn dieser Arbeit eine Versuchsreihe angelegt, bei der Füllungen ( $n = 4$ ) mit der herkömmlichen Bulk-Technik nach Herstellerangaben durchgeführt wurden. Damit war eine Art Ausgangswert geschaffen, mit dem sich alle etwaigen Spannungsreduktionen der anderen Methoden vergleichen ließen.

Die verwendete Messapparatur weist sehr praktische Fakten zur Entwicklung und Untersuchung neuer Füllungsmethoden auf. Zur Spannungsmessung wird rotes Licht verwendet, das nicht im Absorptionsspektrum der verwendeten Photoinitiatoren liegt und daher keine Auswirkungen auf die untersuchten Komposite hat. Des Weiteren lassen sich die entstehenden Schrumpfungsspannungen schon von Beginn der Lichtpolymerisation an beobachten und man erhält bereits nach 1000 s ein auswertbares Spannungsbild. Die Abweichung der Einzelversuche ist bei sorgfältiger Durchführung sehr gering, weshalb ein einziger Füllungsversuch schon ein sehr aussagekräftiges Ergebnis liefert und die Versuchsreihen nicht sehr umfangreich gestaltet werden müssen. Diese Fakten waren vor allem bei den umfangreichen orientierenden Vorversuchen zur Entwicklung der neuen Methoden von erheblichem Vorteil gegenüber anderen Verfahren zur Spannungsmessung, bei denen man teilweise mehrere Monate auf ein Ergebnis warten muss.

Der Nachteil des Messverfahrens bestand in den vergangenen Dissertationen noch im hohen technischen Aufwand bei der Dokumentation, da die Messaufnahmen noch ana-

log auf Videobänder aufgezeichnet und im zweiten Schritt erst digitalisiert wurden. Wir brachten die Messapparatur für diese Arbeit auf den neuesten Stand der Technik, in dem wir die alte CCD-PAL-Kamera durch eine HD-Kamera (BSC HD 1, B&S Technology GmbH) ersetzten und den PC zur Auswertung mit einer dazu passenden Videokarte ausstatteten. Die Videoaufnahmen erfolgten nun direkt digital und konnten am PC im Programm *Stream Catcher* (Data Becker GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Deutschland) nachvollzogen und aufgezeichnet werden. Außerdem war es möglich, mit dem Programm Standbilder nach 1000 s anzufertigen. Mit diesen Neuerungen wurde der Aufwand für die Dokumentation deutlich reduziert. Als positiver Nebeneffekt stieg die Qualität der Aufnahmen erheblich, wodurch wiederum die Genauigkeit beim Festlegen der Isochromatenordnungen in *Image J* erhöht wird.

Die Bonding-Probleme in den Vorversuchen, die bereits von *Nötzel* (2008) beschrieben wurden, konnten durch das neue Bonding-Verfahren zuverlässig behoben werden. Nach Abstrahlen der Kavitäten und Verwendung des Bondingmaterials *Adhese Universal* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), traten keine auf das Bonding zurückzuführenden Abrisse mehr auf. Deshalb konnte auf die in der Literatur beschriebene „tribochemische Silikatisierung“ der Kavitätenoberfläche verzichtet werden [51, 85, 114].

## 6.2 Diskussion des untersuchten Bulk-Fill Komposits

Die Gruppe der Bulk-Fill Komposite wirbt mit sehr geringen Schrumpfungswerten und erhöhten Aushärtungstiefen von bis zu 4 mm bzw. 5 mm beim *Sonic Fill* (Kerr Corporation, Orange, CA, USA). Bei den Materialien wird jedoch nicht nur die Schrumpfung reduziert, sondern auch das E-Modul. Damit werden also beide Edukte der nach *Rullmann et al.* (2012) definierten Gleichung für die Polymerisations-schrumpfungskraft vermindert [51], wodurch diese im Vergleich zu herkömmlichen Hybridkompositen reduziert ist. Die Tabelle 6.2-1 zeigt den Teil der physikalischen Eigenschaften vom *x-tra base*, der für unsere Untersuchungen besonders relevant ist. *Dudda* (2014) verwendete in ihren Untersuchungen zur Vorbelichtung neben dem *x-tra base* auch *SDR* (Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland). Sie konnte für beide

Bulk-Fill Komposite unter Anwendung der von ihr entwickelten Methode der Vorbelichtung eine signifikante Reduktion der polymerisationsbedingten Spannungen erzielen [45]. Da die Methoden dieser Arbeit auf eine ähnliche Vorhärtung der Komposite abzielen, untersuchten wir daher vorerst nur eines der Bulk-Fill Materialien.

| Eigenschaft                 | x-tra base |
|-----------------------------|------------|
| Elastizitätsmodul [MPa]     | 12600      |
| Füllstoffanteil [Gew.-%]    | 75         |
| Druckfestigkeit [MPa]       | 357        |
| Schrumpfung [Vol.-%]        | 2,54       |
| E-Modul x Schrumpfung [MPa] | 320,04     |

Tab. 6.2-1: wichtigsten physikalischen Eigenschaften von x-tra base für die Untersuchungen

Laut Hersteller wird für das Material *x-tra base* bei einer Schichtstärke von bis zu 4 mm eine Belichtungszeit von 10 s für die Farbe universal und 20 s bzw. 40 s für die Farbe A2 empfohlen, die je nach Lichtleistung der Polymerisationslampe angepasst werden muss [110]. In Versuchen zur Aushärtungstiefe des verwendeten *x-tra base* in der Farbe A2, angelehnt an ISO 4049, konnten wir die Herstellerangaben bezüglich der Belichtungszeit für die neue Polymerisationslampe im Blaulicht-Modus bestätigen. Da die gemessene Lichtleistung im Blaulicht-Modus jedoch im Abstand von 5 mm nur  $280 \text{ mW/cm}^2$  beträgt, muss die vom Hersteller angegebene höhere Belichtungszeit von 40 s eingehalten werden. Die Halogenlampe *Translux CL* (Heraeus Kulzer, Bad Sachsa, Deutschland) hatte zum Zeitpunkt der Versuche eine gemessene Lichtleistung von ca.  $728 \text{ mW/cm}^2$ , bei der laut Hersteller eine Belichtungszeit von 20 s nahezu ausreichen sollte. In Abb. 3.1.2-1 lässt sich jedoch erkennen, dass bei unseren Versuchen nach 20 s erst eine Schichtstärke von 3,5 mm ausreichend fest war.

Diese Differenz könnte dadurch zu Stande gekommen sein, dass die Komposithersteller beim Bestimmen der Aushärtungstiefe den Kratztest nach ISO 4049 Norm anwenden müssen, der laut *Flury et al. (2012)* für einige Bulk-Fill-Komposite, verglichen zur Ermittlung der Aushärtungstiefe über Vickers-Härteprofile, zu hohe Werte bezüglich der Aushärtungstiefe ergibt [113].

Wir verwendeten für unsere Versuchsreihen jedoch nur die *VOCO Celalux 2* und die neue Polymerisationslampe, zu der wir vorher für beide Licht-Modi und sämtliche verwendeten Komposite bzw. Kompositmischungen die Mindestbelichtungszeiten bestimmten, damit alle Materialien garantiert ausreichend polymerisiert wurden. Deshalb lassen sich unzureichend polymerisierte Bereiche innerhalb der Kompositmaterialien ausschließen, worauf die ermittelten Spannungsreduktionen fälschlicherweise

zurückgeführt werden könnten, da in der Literatur ein positiver Zusammenhang des Konversionsgrades und der Polymerisationsschrumpfung beschrieben wird [59, 125]. Zusätzlich führten wir exemplarisch bei jeweils einer Probe der beiden neuen Methoden an verschiedenen Positionen Härtemessungen nach Vickers durch. Deren Ergebnisse bestätigten eine ausreichende Polymerisation der verwendeten Komposite (siehe Tab. 6.2-2).

| Methoden / Probe                                  | Position  | HV   |
|---|---|------|
| Anwendung einer Ausgleichsschicht „x-luC27“       | seitlich zentral auf Kernmaterial                   | 51,4 |
|   | 1 mm weiter zervikal auf Kernmaterial               | 50,4 |
|   | seitlich zentral auf Ausgleichsschicht              | 50,3 |
|   | seitlich auf Ausgleichsschicht, direkt am Araldit B | 49,0 |
| Bulk-Fill Technik mit violetter Vorhärtung „CQL1“ | seitlich zentral                                    | 50,9 |
|   | seitlich 1 mm oberhalb zentral                      | 51,2 |
|   | Araldit B   | 20,9 |

Tab. 6.2-2: exemplarische Härtemessungen nach Vickers an jeweils einer Probe der beiden neuen Methoden und am Araldit B. Belastungszeit: 15 s, Last: 200g.

### 6.3 Diskussion der technischen Entwicklung einer neuen Polymerisationslampe

Zur Entwicklung der neuen Polymerisationslampe bewegte uns die Vision, zwei verschiedene Photoinitiatoren vollständig unabhängig voneinander praxistauglich aktivieren zu können. Bisher gibt es keine Polymerisationslampe, mit der dies möglich ist.

Zuerst testeten wir in den Vorversuchen mit der *Celalux 2* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland), ob herkömmliche blaue Monowave-LED-Lampen überhaupt den Photoinitiator *Lucirin® TPO* aktivieren können. Tatsächlich reichte deren kleiner Lichtanteil im Absorptionsspektrum des *Lucirin® TPO* dazu aus, das Komposit nach einer gewissen Zeit erhärten zu lassen. Deshalb versuchten wir mit einem geeigneten LEE Filter das Spektrum der Lampe so einzuschränken, dass eine unabhängige Aktivierung von Kampferchinon möglich wurde. Abgesehen davon konnte die Aktivierung von Kampferchinon und *Lucirin® TPO* gleichzeitig mit der Halogenlampe *Translux CL*

(Heraeus Kulzer, Bad Sachsa, Deutschland) erfolgen, da deren Lichtspektrum ausreichende Lichtanteile in den Absorptionsbereichen beider Photoinitiatoren enthält. Mit dieser Modifikation war es allerdings nicht möglich, *Lucirin® TPO* unabhängig vom Kampferchinon zu aktivieren. Des Weiteren war diese Methode alles andere als praxistauglich und zu dem sehr unzuverlässig, da es trotz des angegebenen Transmissionspektrums des Filters teilweise zu einer geringfügigen Aktivierung des Photoinitiators *Lucirin® TPO* kam.

Deswegen konzentrierten wir uns weiter auf die LEDs, deren Emissionsspektren im Vergleich zu Halogenlampen sehr eingeschränkt sind. Auf dem Markt standen uns sehr viele verschiedene LEDs mit den unterschiedlichsten Emissionsspektren zur Verfügung. Außerdem gab es, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, bereits Polymerisationslampen auf dem Markt, in denen mehrere LEDs mit verschiedenen Wellenlängenmaxima verbaut sind. Ein großes Problem dieser Lampen besteht jedoch in der inhomogenen Intensitätsverteilung der verschiedenen Wellenlängen am Lichtaustrittsfenster (siehe Abb.2.2-3). Idealerweise sollten die Intensitätsverteilungen im Nahfeld des Austrittsfensters der Lampe für beide Wellenlängen nahezu identisch sein. Wenn die verschiedenen LEDs nebeneinander angeordnet sind, ist dies nur bedingt erreichbar. Man hätte diese Lampen zwar eventuell dahingehend modifizieren können, dass sich ihre verschiedenen LEDs nacheinander einschalten lassen, jedoch wären sie auch dann aufgrund der inhomogenen Verteilung nicht für unsere Methoden geeignet gewesen.

Deshalb entschlossen wir uns letztendlich zur Entwicklung der Polymerisationslampe aus Kapitel 3.1.1.

#### 6.4 Diskussion der Vorgehensweise beim Mischen der Komposite

Zwei fließfähige Komposite mit unterschiedlichen Photoinitiatoren mithilfe eines kleinen Spatels auf dem Lichtblock zu vermischen, stellt sicher nicht den Goldstandard der Komposit-Mischtechnik dar und die Mischungen waren damit nicht garantiert vollständig homogen vermischt. Unsere Möglichkeiten zum Anfertigen von Kompositmischungen waren jedoch sehr beschränkt und die angefertigten Mischungen waren für die durchgeführten Versuche vorerst ausreichend, da der gewünschte Effekt erzielt

werden konnte. Beim Entnehmen der fertigen Kompositmischungen vom Lichtblock und dem Abfüllen in die Compulen kann es durch eine eventuelle Inhomogenität der Mischungen außerdem dazu gekommen sein, dass ungleichmäßige Anteile der beiden vermischten Komposite verbleiben. Dadurch weicht das endgültige Mischungsverhältnis in den Compulen eventuell leicht von den ursprünglich zusammengefügteten Massenanteilen ab. Des Weiteren waren die Unterschiede der endgültig errechneten prozentualen Konzentrationen der Photoinitiatoren bei den verschiedenen verwendeten Mischungen so gering, dass sich lediglich ein Konzentrationsbereich der beiden Photoinitiatoren festlegen ließ, mit dem sich unsere Verfahren anwenden lassen.

Der Anteil des Kampferchinons im herkömmlichen *x-tra base* beträgt nur 0,3 Gew.-% der Harzmatrix. Bei einem Fülleranteil im *x-tra base* von 70 Gew.-% bleibt ein Matrixanteil von 30 Gew.-%. Ein Anteil von 0,3 Gew.-% der Harzmatrix ergeben also nur einen Anteil von 0,09 Gew.-% am gesamten Komposit. Beispielsweise variierten wir bei den Kompositmischungen, die für die Ausgleichsschicht verwendet wurden, den Massenanteil vom *x-tra base* mit Kampferchinon an der Kompositmischung zwischen 3 Gew.-% und 10 Gew.-%. Damit lag der Kampferchinonanteil am Gesamtgemisch im Bereich von 0,0027 Gew.-% bis 0,009 Gew.-%. Im *x-tra base* mit *Lucirin® TPO* beträgt der *Lucirin® TPO*-Anteil an der Harzmatrix laut Hersteller 0,42 Gew.-%. Deshalb ist der Anteil am Gesamtgemisch bei gleichem Füllkörperanteil ebenfalls etwas höher.

Aufgrund der eventuell inhomogenen Vermischung kann es außerdem dazu kommen, dass sich innerhalb der Kompositmischungen nicht sicher an jeder Stelle die gleiche Konzentration desselben Photoinitiators befindet. Dadurch könnten vor allem bei der dünnen Ausgleichsschicht Bereiche auftreten, an denen die verwendete Mischung zu viel oder zu wenig Kampferchinon enthält und somit vom blauen Licht zu wenig oder schon zu viel ausgehärtet wird. Es besteht also die Möglichkeit, dass die Spannungswerte durch sehr homogene Mischungen noch weiter reduziert werden können und sich ein kleinerer Bereich von Photoinitiorenkonzentrationen definieren lässt, mit dem eine gezielte Vorhärtung erreicht werden kann.

## 6.5 Diskussion der Ergebnisse

### 6.5.1 Diskussion der Bulk-Fill Technik

Bei der Anwendung der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangaben variierten die gemessenen Spannungswerte je nach verwendeten Bonding-Verfahren, lagen jedoch beide über denen von *Dudda* (2014), obwohl sie mit demselben *x-tra base* Material und nahezu derselben Messmethode arbeitete. Der Mittelwert ihrer Untersuchungen beträgt nahezu 9 MPa, wohingegen der Mittelwert unserer Bulk-Fill Versuche mit dem alten Bonding-Verfahren bei ca. 10,24 MPa und bei Anwendung des neuen Bonding-Verfahrens bei ca. 12,84 MPa liegt [45]. Die Spannungsmittelwerte der beiden Versuchsreihen unterscheiden sich damit um ca. 2,6 MPa, was einem Anteil von ca. 20 % entspricht (siehe Abb. 6.5.1-1)

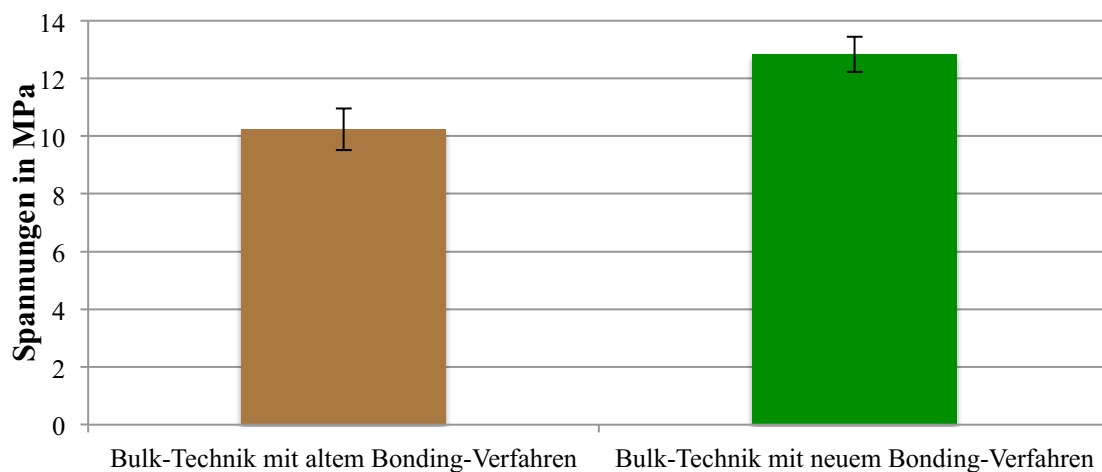


Abb. 6.5.1-1: Spannungswerte von *x-tra base* bei Anwendung der Bulk-Technik und Verwendung der beiden verschiedenen Bonding-Verfahren in MPa nach 1000 s im Vergleich.

Auch *Nötzel* (2008) arbeitete mit dieser Messmethode und konnte selbst für Blockfüllungen mit dem lighthärtenden Feinhybridkomposit *Arabesk TOP* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland), einer Vorabversion des heute auf dem Markt erhältlichen Komposits *Grandio* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland), lediglich Spannungswerte von ca. 8,9 MPa ermitteln [109].

Der einzige Unterschied zwischen der ersten Bulk-Fill Versuchsreihe dieser Arbeit und

den Bulk-Fill Versuchen von *Dudda* (2014) stellt die Verwendung einer anderen Kamera dar. Bei der zweiten Bulk-Fill Versuchsreihe dieser Arbeit kommt zusätzlich das Bonding-Verfahren als Unterschied hinzu. *Nötzel* (2008), der dasselbe Bonding-Verfahren nutzte wie *Dudda* (2014), beschreibt in seinen Versuchen vermehrte Verbundfehler zwischen der Kavitätenwand und dem Bondingmaterial *Solobond M* [109]. Er konnte deren Auftreten zwar durch vorsichtiges Anrauen der Kavitätenoberfläche mit einem rosa Steinchen und eine Verlängerung der Belichtungszeit des Bondings minimieren, dennoch ließen sie sich nicht vollständig vermeiden. Auch *Dudda* berichtete mir mündlich von Verbundfehlern, die vor allem bei hohen Umgebungstemperaturen auftraten. Bei uns traten diese Probleme in den Vorversuchen vor allem bei Füllmethoden mit hoher Spannungsentwicklung auf, weshalb wir uns zur Modifikation des Bonding-Verfahrens entschieden. Das Abstrahlen der Kavitäten in Verbindung mit der Kombination von Aceton und *Heliobond* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) verbesserte die Qualität und Zuverlässigkeit des Bondings schon deutlich. Durch die Verwendung von *Adhese Universal* (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) in Verbindung mit dem Abstrahlen der Kavitätenoberfläche konnten wir letztendlich sehr gute und zuverlässige Bonding-Ergebnisse erzielen, weshalb wir dieses Bonding-Verfahren für alle Hauptversuche nutzten. Mit diesem Verfahren traten, im Vergleich zum Bonding-Verfahren mit angerauten Kavitätenwänden und *Solobond M*, bei den Bulk-Fill Versuchen insgesamt deutlich erhöhte Spannungswerte auf. Daraus lässt sich die Vermutung ableiten, dass Anteile der höheren Spannungswerte auf einen verbesserten Verbund zwischen Kavitätenoberfläche und Bondingmaterial zurückzuführen sind, da sowohl *Nötzel* (2008) als auch *Dudda* (2014) bei ihren Bonding-Verfahren auf die in der Literatur beschriebene tribochemische Vorbehandlung der Kavitätenoberfläche mit dem CoJet-System verzichteten [51, 85].

Eine weitere Ursache für erhöhte Spannungswerte könnte die neue Kamera darstellen. Die Genauigkeit bei der Vermessung der spannungsoptischen Bilder in *ImageJ* wird durch die hochauflösende HD-Qualität deutlich gesteigert. Die Abbildungen 6.5.1-2 und 6.5.1-3 zeigen dazu zwei spannungsoptische Bilder von Blockfüllungen mit *x-tra base*, von denen eines mit der alten CCD-PAL-Kamera (Abb. 6.5.1-2) und eines mit der neuen HD-Kamera (Abb. 6.5.1-3) aufgezeichnet wurde. Die Vermessung der Bilder ist aufgrund der erhöhten Pixelanzahl vor allem im Bereich des Kavitätenrandes



deutlich genauer geworden, da hier bei der alten Kamera teilweise kein oder nur ein Pixel zwischen Kavitätenrand und der höchsten Spannungsordnung vorhanden war.

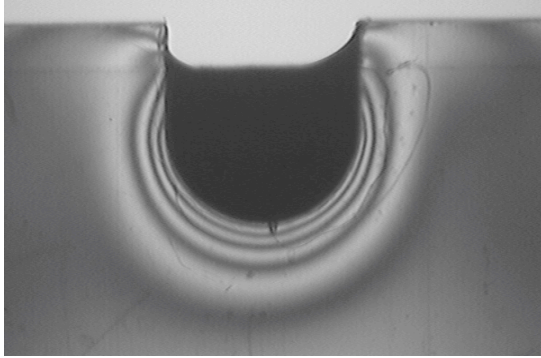


Abb. 6.5.1-2: Spannungsbild der alten Kamera

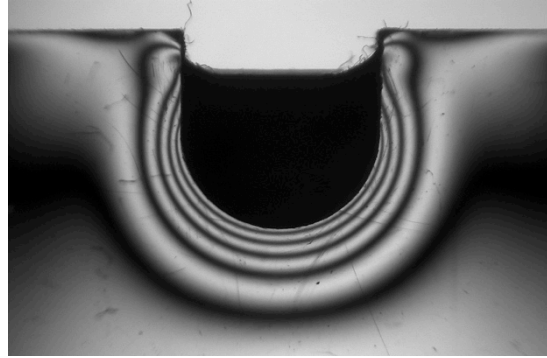


Abb. 6.5.1-3: Spannungsbild der neuen Kamera

Es konnte also passieren, dass die höchste Isochromatenordnung so nahe am Kavitätenrand lokalisiert war, dass man sie zwar teilweise mit dem bloßen Auge erkennen konnte, sie jedoch nicht mehr im Helligkeitsprofil abgebildet wurde. Die ermittelten Spannungswerte waren dann zu gering. Des Weiteren war eine genauere Festlegung des Kavitätenrandes als Startpunkt der Helligkeitsprofile möglich.

### 6.5.2 Schichttechnik

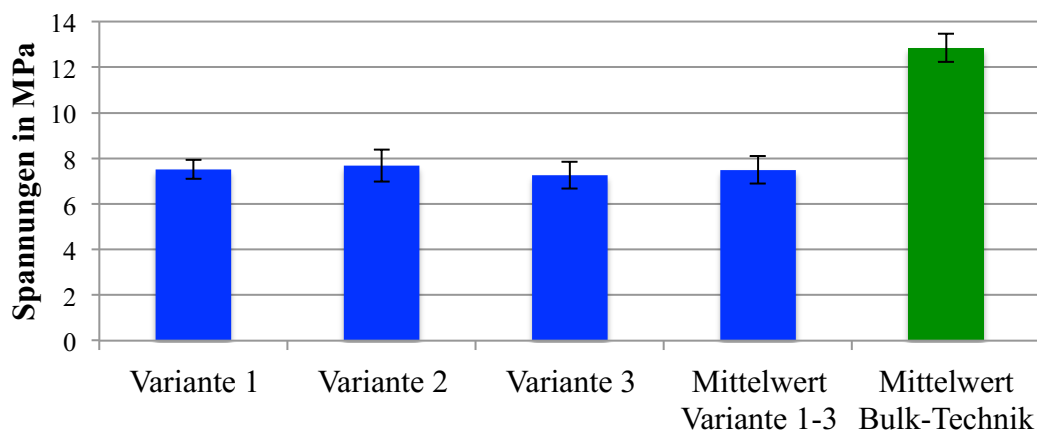


Abb. 6.5.2-1: Spannungsmittelwerte der verschiedenen Varianten (blau) im Vergleich zum Spannungsmittelwert der Bulk-Technik mit neuem Bonding-Verfahren aus Kapitel 5.1 (grün) in MPa nach 1000 s.

Bei den drei verschiedenen untersuchten Schichtgeometrien, variierte zwar die Verteilung der Spannungen in den spannungsoptischen Bildern (siehe Abb. 5.2-1, Abb. 5.2-3 und Abb. 5.2-5), jedoch ergab sich in Bezug auf die ermittelten Gesamtspannungen kein nennenswerter Unterschied. Deshalb bildeten wir aus den Spannungsmittelwerten der drei verschiedenen Varianten einen Gesamtmittelwert für die Schichttechnik, den wir zum Vergleich mit den anderen Methoden nutzten. Wie anhand zahlreicher Literatur zu erwarten war [63, 64, 65, 66], führte die Anwendung der konventionellen Schichttechnik im Vergleich zur Bulk-Technik zu einer signifikanten Spannungsreduktion ( $p < 0,05$ ). In Abbildung 6.5.2-1 ist zu erkennen, dass die Spannungen durch Anwendung der Schichttechnik im Vergleich zur Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe im Mittel um ca. 5,35 MPa reduziert wurden, was einem Anteil von ca. 42% entspricht. Dazu muss gesagt werden, dass die Schichtfüllungsversuche noch mit dem alten Bonding-Verfahren und alter Kameratechnik durchgeführt wurden. Man könnte also den Rückschluss ziehen, dass es sinnvoller wäre, als Vergleichswert den Mittelwert der Bulk-Technik Versuchsreihe aus Abbildung 5.1-2 zu wählen, bei dem auch das alte Bonding-Verfahren und die alte Kamera verwendet wurden. Dabei würde sich eine Spannungsreduktion von ca. 2,5 MPa ergeben, was ungefähr einem Anteil von 27 % entspricht (Abb. 6.5.2-2). Zur Kontrolle führten wir abschließend jedoch eine Versuchsreihe durch, bei der wir die Versuchskavitäten mit der Schichttechnik nach der ersten Variante abfüllten (siehe Abb. 5.2-8). Dabei zeigten sich keine nennenswerten Spannungsunterschiede zur Versuchsreihe aus Abbildung 5.2-2, bei der die Kavitäten nach derselben Variante abgefüllt wurden, man jedoch das alte Bonding-Verfahren anwendete. Diese Tatsache lässt darauf schließen, dass das neue Bonding-Verfahren bei Füllungsverfahren mit höherer Spannungsentwicklung bessere Haftungsergebnisse erzielt und somit zu höheren Spannungen im Araldit B führt, bei Füllungsverfahren mit weniger hoher Spannungsentwicklung jedoch keine Spannungsunterschiede zwischen den beiden Bonding-Verfahren zu erkennen sind (Abb. 6.5.2-2).

Mit diesen Ergebnissen kann also die allgemein gültige Aussage bestätigt werden, dass bei Verringerung der auszuhärtenden Kompositmasse und Verkleinerung des C-Faktors eine signifikante Spannungsreduktion erzielt werden kann. Nachteil der Schichttechnik ist allerdings der deutlich gesteigerte Zeitaufwand gegenüber der Bulk-Technik.

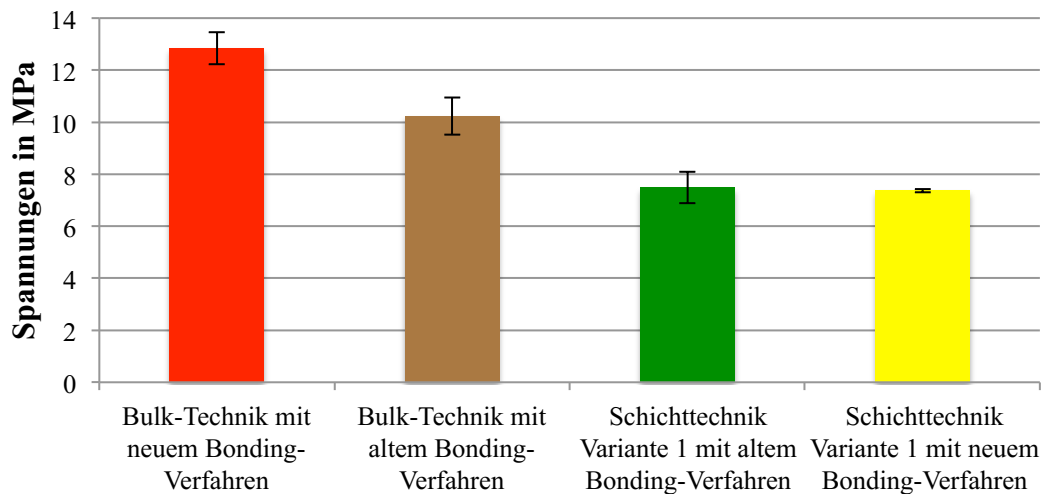


Abb. 6.5.2-2: Spannungswerte von x-tra base bei Anwendung der Bulk-Technik bei Verwendung des neuen (rot) und alten (braun) Bonding-Verfahrens und der Schichttechnik bei Verwendung des alten (grün) und neuen (gelb) Bonding-Verfahrens in MPa nach 1000 s im Vergleich.

### 6.5.3 Anwendung einer Ausgleichsschicht

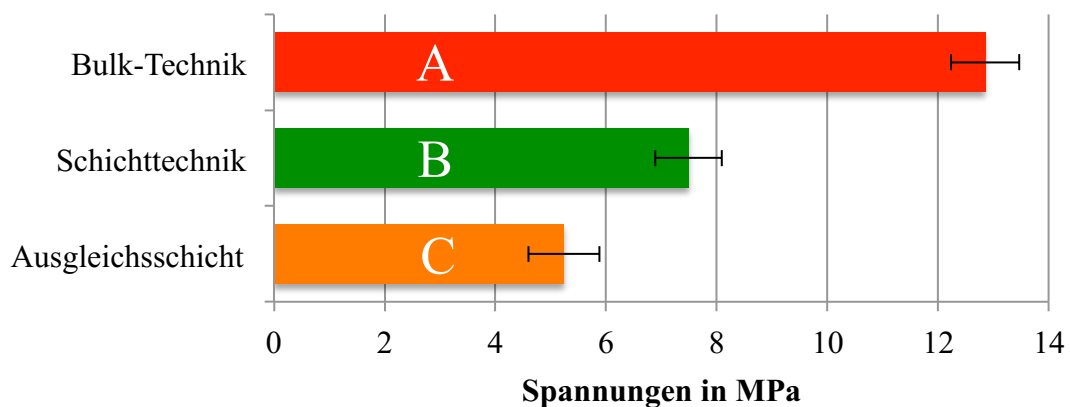


Abb. 6.5.3-1: Vergleich der Spannungsmittelwerte von x-tra base bei Anwendung verschiedener Füllungstechniken (Bulk-Technik, Schichttechnik, Ausgleichsschicht) in MPa nach 1000 s. Zwischen den unterschiedlichen Buchstaben in den Balken bestehen signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ).

Die Verwendung einer Ausgleichsschicht zur Kompensation der Spannungen des Komposits im Kavitätenkern führte gegenüber der Bulk-Fill Technik zu einer signifikanten Spannungsreduktion von ca. 59 %. Die Spannungen konnten mit dieser Methode sogar im Vergleich zur Schichttechnik signifikant reduziert werden, obwohl bei den

Versuchsreihen zur Schichttechnik noch das alte Bonding-Verfahren und die alte Kamera verwendet wurde. Dennoch liegt der Spannungswert bei Anwendung der Ausgleichsschicht um ca. 30 % niedriger, als der ermittelte mittlere Spannungswert der Schichttechnik.

Bei dieser Methode ist der Zustand der Ausgleichsschicht nach der Vorhärtung besonders wichtig. Zum Einen darf die Ausgleichsschicht dabei nicht den Gelpunkt überschreiten, weil sie dann nicht mehr kriechfähig wäre. Zum Anderen darf sie nicht mehr fließfähig sein, da beim Befüllen des Kavitätenkerns sonst das Risiko besteht, dass sie an einigen Stellen vollständig verdrängt wird. Wahrscheinlich lassen sich die Spannungen, wie in Kapitel 6.4 bereits angesprochen, mit aufwändigeren Methoden, die eine homogene Vermischung der verschiedenen Photoinitiatoren in dem für die Ausgleichsschicht verwendeten Komposit gewährleisten, noch weiter verringern.

Wenn man wie in unseren Versuchen bei dieser Methode ausschließlich Bulk-Fill-Flowables verwendet, ist im kaulastragenden Bereich immer eine mindestens 2 mm starke Deckfüllung mit Hybridkompositen notwendig [126]. Eine solche Deckfüllung verursacht zwar nur noch sehr geringe zusätzliche Spannungen, bedeutet jedoch immer einen zeitlichen Mehraufwand für den Behandler. Eine Vision besteht deshalb darin, den Kavitätenkern mit stopfbarem Bulk-Fill Komposit zu füllen, wodurch keine Deckfüllung mehr nötig wäre, eine Schichtstärke von 4 mm aber weiterhin möglich bliebe.

Einen weiteren wichtigen Faktor stellt die Schichtstärke der Ausgleichsschicht dar. Je dicker sie ist, desto mehr Spannungen kann sie im kriechfähigen Zustand ausgleichen, verursacht bei ihrer Endhärtung aufgrund des hohen C-Faktor in der „Klebefuge“ aber auch mehr Spannungen. Je dünner sie ist, desto weniger Spannungen kann sie kompensieren, aber desto weniger Spannungen treten bei ihrer Endhärtung auf.

Eine Überlegung besteht darin, die Ausgleichsschicht und das Bonding zu einem Schritt zu vereinigen, wodurch ein „Ausgleichsbonding“ entstehen würde. Dazu schwebt uns die Verwendung eines gefüllten Adhäsivs oder eines sehr dünnfließenden Bulk-Fill-Flowables vor. Dieses würde man, dicker als beim Bonding üblich, auftragen und dann gezielt in den Übergangszustand versetzen. Im Anschluss würde der Kavitätenkern aufgefüllt und unabhängig ausgehärtet werden. Im abschließenden Schritt würde das „Ausgleichsbonding“ vollständig lichtpolymerisiert.

*Frankenberger* (2002) ermittelte in einer Studie, dass die von ihm getesteten fließfähi-

gen Komposite nicht als Bonding-Ersatz genutzt werden sollten. Er zeigte jedoch, dass fließfähige Komposite sehr niedriger Viskosität, wie Ultraseal XT Plus (Ultradent, South Jordan, USA), auch ohne Bonding adäquat an den Schmelz binden [76]. Bei der Methode der Ausgleichsschicht sind die auftretenden Spannungen jedoch viel geringer als bei einer Schichtfüllung. Bei Verzicht auf das Bonding würde die geringere Haftkraft der dünnfließenden Flowables deshalb eventuell nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Außerdem lässt sich bei dieser Methode das Konzept der Minimalinvasivität umsetzen, was bei indirekt gefertigten Inlays aufgrund großer unter sich gehender Defekte oft nicht möglich ist. Teilweise muss dabei viel gesunde Zahnhartsubstanz für die offene Konizität der Kavität geopfert werden, was bei dieser Art „direktem Kompositinlay“ nicht notwendig ist.

#### 6.5.4 Bulk-Technik mit Vorhärtung

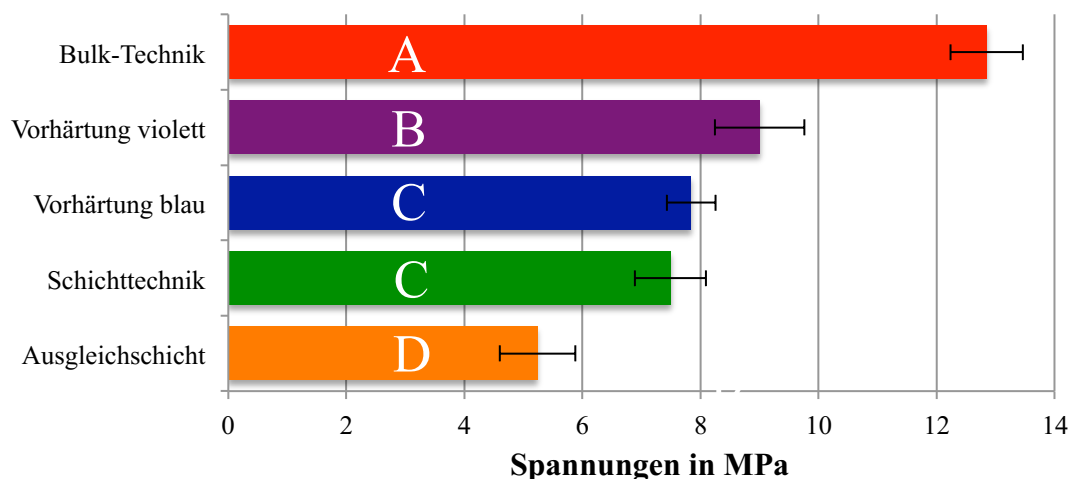


Abb. 6.5.3-1: Vergleich der Spannungsmittelwerte von x-tra base bei Anwendung verschiedener Füllungstechniken (Bulk-Technik, Schichttechnik, Ausgleichsschicht, Bulk-Technik mit blauer bzw. violetter Vorhärtung) in MPa nach 1000 s. Zwischen den unterschiedlichen Buchstaben in den Balken bestehen signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ).

Die wichtigsten Faktoren bei allen Vorhärtungsversuchen waren die genaue Zusammensetzung der Photoinitiatoren im Komposit und die eingestrahlte Energiedosis. Ver-

ringerte man bei gleichbleibender Photoinitiatorkonzentration die Energiedosis während der Vorbelichtung, nahm die Effektivität des Vorhärtens und damit auch die Spannungsreduktion ab, da das eingebrachte Komposit nicht vollständig in den Übergangszustand versetzt wurde. Wenn von dem beim Vorhärten aktivierten Photoinitiator zu viele Moleküle im Kompositgemisch enthalten waren, konnte es bei ausreichend hoher Energiedosis vollständig aushärten. Steigerte man beispielweise bei der Vorhärtungsmethode mit blauem Licht den Kampferchinonanteil im Kompositgemisch geringfügig, konnte die Lichtdosis zur Vorhärtung reduziert werden. Da bei dieser Mischung dann allerdings ausreichend viele Kampferchinon-Moleküle für die vollständige Polymerisation vorhanden waren, bestand das Risiko, dass eine zu hohe Energiedosis bei der Vorhärtung zumindest teilweise bereits zur vollständigen Polymerisation des Komposits führt. Umgekehrt gilt genau dasselbe für die Vorhärtungsmethode mit violetterem Licht, wenn man den Massenanteil von *Lucirin® TPO*-haltigem Komposit am Kompositgemisch erhöht.

Selbst wenn bereits Teile des Komposits während der Vorhärtung vollständig polymerisierten, waren die entstandenen Spannungen immer noch deutlich geringer, als bei der Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe. Das Erreichen des Gelpunktes war dann zwar nicht mehr abhängig vom Umschalten des Licht-Modus der neuen Polymerisationslampe, dennoch wird die Pre-Gelphase im Vergleich zur Bulk-Fill Technik und den Soft-Start-Methoden deutlich verlängert, wodurch mehr Spannungen durch nachkriechendes Material kompensiert werden können.

## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Zusammenfassung (deutsch)

Die Polymerisationsschrumpfung und die daraus resultierenden Spannungen im Zahn stellen auch heute noch eine erhebliche, bisher ungelöste Herausforderung für die Wissenschaft dar.

Aktuell dient die Inkrementtechnik als Standardmethode zur Spannungsreduktion. Sie gewährleistet eine adäquate Haftung des Füllmaterials am Zahn und eine ausreichende Durchhärtung, bedeutet jedoch einen zeitlichen Mehraufwand. Vor einigen Jahren kamen sogenannte Bulk-Fill Komposite auf den Markt, die deutlich geringere Polymerisationsschrumpfungen hervorrufen und Aushärtungstiefen von 4 - 5 mm ermöglichen. In dieser Studie wurde für alle Versuche das fließfähige Bulk-Fill Komposit *x-tra base* (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland) verwendet.

Ziel dieser Studie war es eine Methode zu entwickeln, mit der Spannungsreduktionen ohne erhöhten Zeitaufwand möglich werden. Dabei orientierten wir uns am Gradientenmodell nach *Sommer* und *Gente*, das von *Dudda* um eine vierte Phase, die sogenannte Übergangsphase, ergänzt wurde. In dieser Phase ist das Komposit nicht mehr fließfähig, aber auch noch nicht fest und kann im Bereich einiger Mikrometer Spannungen durch „Kriechen“ ausgleichen. Daraus entstand die Hypothese, das Komposit zunächst gezielt vollständig in die Übergangsphase zu versetzen, bevor es in einem zweiten Schritt vollständig ausgehärtet wird. Für diese Methode nutzten wir zwei Photoinitiatoren, die verschiedene Absorptionsspektren aufweisen. Bei Aktivierung des ersten Photoinitiators darf nur der Übergangszustand erreicht, nicht aber der Gelpunkt überschritten werden. Alle auftretenden Spannungen werden bis hierhin kompensiert. Erst die Aktivierung des zweiten Photoinitiators führt zur vollständigen Aushärtung des Komposits. Die Photoinitiatoren müssen dazu in bestimmten Konzentrationen vorliegen und mit einer speziell entwickelten Polymerisationslampe unabhängig voneinander aktivierbar sein.

Außerdem nutzten wir das Komposit mit der Photoinitiatorenmischung als eine Art „Ausgleichsschicht“ auf den Kavitätenwänden, die man erst in den kriechfähigen

Übergangszustand versetzt und dann den Kavitätenkern mit herkömmlichem Bulk-Fill Komposit auffüllt und unabhängig aushärtet. Nachdem die Schrumpfung des Kernmaterials von der „Ausgleichsschicht“ kompensiert wurde, härtet man sie vollständig aus. Man erhält im Sinne der Minimalinvasivität eine Art „direktes Kompositinlay“. Im kaulasttragenden Bereich muss diese Füllung mit einer okklusalen Deckfüllung aus einem Hybridkomposit abgedeckt werden, wodurch sich die Gesamtheit der Spannungen aber kaum ändert.

In dieser Studie werden die beiden Methoden, sowie die Verarbeitung nach Herstellerangabe und die Schichttechnik als Vergleichswert mit der spannungsoptischen Messmethode untersucht und die dazugehörige technische Umsetzbarkeit erprobt.

Die technische Umsetzung gelang mit einem Polymerisationslampen-Prototyp, der mit zwei LEDs arbeitet. Die Emissionsmaxima der LEDs liegen bei 400 nm und 465 nm und ihre Intensität und Dauer ist variabel einstellbar. Über einen dichroitischen Spiegel erfolgt die homogene Ausleuchtung des Lichtfeldes und die Selektion der Wellenlängen bei 435 nm  $\pm$  10 nm, die der unabhängigen Aktivierung der verwendeten Photoinitiatoren dient. Die beschriebene Polymerisationslampe wurde von Herrn Prof. Dr. M. Gente und mir als Erfindung gemeldet, von der Philipps-Universität Marburg in Anspruch genommen und national, sowie international zum Patent angemeldet.

Die Ergebnisse zeigten für beide neuen Methoden und die Schichttechnik eine signifikante Spannungsreduktion im Vergleich zur Bulk-Technik nach Herstellerangabe. Die Spannungsreduktion ist durch das erweiterte Gradientenmodell insgesamt schlüssig erklärbar.

Die Methode der zweizeitigen Aushärtung des Komposits ist ähnlich effektiv, wie die Anwendung der Schichttechnik, bei der für verschiedene Geometrien kein nennenswerter Unterschied ermittelt werden konnte. Die Spannungen bei der Methode der Ausgleichsschicht sind sogar nochmals signifikant geringer. In Zukunft sollte man die technische Umsetzung noch verbessern, sowie die Methode der Vorhärtung auf stopfbare Komposite umsetzen. Außerdem könnte sich für den Behandler durch gefüllte Adhäsive oder sehr dünnfließende Bulk-Fill-Flowables die zeitsparende Vision ermöglichen, dass man die Ausgleichsschicht und das Bonding zu einem Schritt vereint, wodurch eine Art „Ausgleichsbonding“ entstehen würde.



## 7.2 Abstract (english)

The polymerisation shrinkage and the resulting stress in teeth is still a considerable, unsolved challenge for dental science.

Currently, the incremental technique is the state of the art method to reduce stress. It ensures an adequate adhesion of the filling material to the tooth-surface and reliable through-hardening, but also means additional time requirement.

A few years ago, so-called bulk-fill composites were launched, which result in significantly lower polymerisation shrinkage and allow curing depths of 4 – 5 mm. In this study, the bulk- fill flowable x-tra base (VOCO GmbH, Cuxhaven, Germany) was used for all experiments.

The aim of this study was to develop a method to reduce stress, without any additional time requirement. We followed the „Gradientenmodell“ by *Sommer* and *Gente*, which *Dudda* extended by a fourth phase, the so-called „Übergangsphase“. In this phase, the composite is no longer free-flowing, but is also not yet solid and can compensate stress by „creeping“ in the range of some micrometer. This led to the hypothesis that the composite should first be completely transposed into the „Übergangszustand“ before it is completely cured in a second step. For this method we used two photoinitiators with different absorption spectra. When the first photoinitiator is activated, only the „Übergangszustand“ can be reached, but the gel-point must not be exceeded. Up to this point, all upcoming stress is completely compensated. Only the activation of the second photoinitiator leads to the complete curing of the composite. For this purpose, the photoinitiators must be present in certain concentrations and it must be possible to activate them independently of one another with a specially developed polymerisation lamp.

A second method is to use the above-described composite with two different photoinitiators as a kind of „compensating layer“ on the cavity walls. In the next step this layer is transferred into the creepable „Übergangszustand“, in which they can still compensate upcoming stress. Subsequently, the cavity core is filled with a conventional bulk-fill composite. Following, the core is cured independently of the „compensating layer“, which compensates all the shrinkage of the core before it is cured completely by activating the second photoinitiator in the last step. A sort of „direct composite inlay“ is obtained. In occlusal areas, this filling must be covered by an universal hybrid

resin composite. The total stress amount, however, hardly changes. Furthermore, it is possible to follow the concept of minimal invasiveness with this method, which is not always the case for indirect inlay preparations.

In this study, we examined the two methods and for comparison the bulk-fill technique according to manufacturer's specification as well as the incremental technique relating to the generated stress by photoelastic method and tested the technical implementation. The technical implementation was achieved with a polymerisation lamp prototype which operates with two LEDs. The emission maxima of the LEDs are 400 nm and 465 nm. Their intensity and duration can be adjusted variably. The homogeneous illumination of the light field and the selection of the wavelengths at 435 nm  $\pm$  10 nm, which is essential for the independent activation of the two photoinitiators, is effected via a dichroic mirror. The described polymerisation lamp was registered as an invention by Prof. Dr. M. Gente and myself, claimed by the Philipps-University (Marburg, Germany) national and international patent pending.

The results showed a significant reduction of the stress for both new methods and the incremental technique in comparison to the bulk-fill technique. The stress reduction seems logical according to the extended „Gradientenmodell“. The „two-step curing“ method was as effective as the incremental technique, for which we could not detect any appreciable difference between different geometries of the layers. The generated stress by using the „compensating layer“ method was even significantly lower. In the future, the technical implementation should be improved and the „two-step curing“ method should also work with conventional resin composites. In addition, it could be possible to use filled adhesives or very low viscosity bulk-fill flowables to combine the bonding and the „compensation layer“ in one step. Thus creating a time-saving „compensating bonding“.

## 8 Veröffentlichungen

Ausschnitte dieser Dissertation wurde in Form einer Poster-Präsentation vorgestellt und zum Patent angemeldet (Europa):

1. Poster-Präsentation im Rahmen des 30. DGZMK / BZÄK / Dentsply-Sirona Förderpreises 2016, ausgezeichnet mit dem 1. Preis in der Kategorie „Klinische Studien, Klinische Verfahren und Behandlungsmethoden“,  
Kusch, M.: **„Reduktion der Spannungsentwicklung von Kompositfüllungen durch neue Methoden der Steuerung der Lichtpolymerisation“**
2. Europäische Patentanmeldung:  
EP 3 173 062 A1 – Veröffentlichungstag: 31.05.2017, Patentblatt 2017/22 -  
Anmeldenummer: EP 15 197 159.5 - Anmeldedatum: 30.11.2015,  
**Bezeichnung: Polymerisationslampe und Komposite zur Füllung von Zahnkavitäten**
3. PCT-Antrag:  
PCT-Aktenzeichen: PCT/EP2016/079060 – Eingangsdatum: 29.11.2016  
**Titel: Polymerisationslampe und Komposite zur Füllung von Zahnkavitäten**

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] **Ferracane, J. L. (2011).** Resin composite - State of the art. *Dental Materials*, 27(1), 29–38.
- [2] **Manhart, J. (2006).** Charakterisierung direkter zahnärztlicher Füllungsmaterialien für den Seitenzahnbereich – Alternativen zum Amalgam? *Die Quintessenz* 2006; 57 (5): 465-481
- [3] **Manhart, J., Kunzelmann, K. H., Chen, H. Y., & Hickel, R. (2000).** Mechanical properties and wear behavior of light-cured packable composite resins. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 16(1), 33–40.
- [4] **Ferracane, J. L. (2008).** Buonocore Lecture. Placing dental composites--a stressful experience. *Operative Dentistry*, 33(3), 247–57.
- [5] **Lee, M.-R., Cho, B.-H., Son, H.-H., Um, C.-M., & Lee, I.-B. (2007).** Influence of cavity dimension and restoration methods on the cusp deflection of premolars in composite restoration. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 23(3), 288–95.
- [6] **Lee, S.-Y., & Park, S.-H. (2006).** Correlation between the amount of linear polymerization shrinkage and cuspal deflection. *Operative Dentistry*, 31(3), 364–70.
- [7] **Alomari, Q. D., & Mansour, Y. F. (2005).** Effect of LED curing modes on cusp deflection and hardness of composite restorations. *Operative Dentistry*, 30(6), 684–9.
- [8] **Hickel R. (2012).** Neueste Komposite - viele Behauptungen. *BZB Bayerisches Zahnärzteblatt* 2012;49(9):50-53
- [9] **Ilie, N., & Hickel, R. (2011).** Investigations on a methacrylate-based flowable composite based on the SDR<sup>TM</sup> technology. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 27(4), 348–55.
- [10] **Manhart, J. (2010).** Neues Konzept zum Ersatz von Dentin in der kompositbasierten Seitenzahnversorgung. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, 119(3), 118–125.
- [11] **Caughman, W. F., Caughman, G. B., Shiflett, R. A., Rueggeberg, F., & Schuster, G. S. (1991).** Correlation of cytotoxicity, filler loading and curing time

- of dental composites. *Biomaterials*, 12(8), 737–740.
- [12] **Facher A, Vogel K, Grabher K, Hirt T, Heintze S. (2013).** Comparison of flowable composites for bulk filling. *J Dent Res:Poster Presentation (Nr. 175701) at the IADR General Session Seattle, March 20-23, 2013.*
- [13] **Burtscher, P. (2011).** Von geschichteten Inkrementen zur Vier-Millimeter-Bulk-Fill-Technik – Anforderungen an Komposit und Lichthärtung. *DZW Die Zahnarzt Woche (39): 6-8 (2011)*
- [14] **Kwon, Y., Ferracane, J., & Lee, I.-B. (2012).** Effect of layering methods, composite type, and flowable liner on the polymerization shrinkage stress of light cured composites. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 28(7), 801–9.
- [15] **Bowen, R. L. (1963).** Propterties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. *The Journal oft he American Dental Association*, Vol. 66, pp. 57-64, 1963.
- [16] **Hellwig, E., Klimek, J., Attin, T. (2013).** Einführung in die Zahnerhaltung. *Deutscher Zahnärzte Verlag (6. Auflage, 2013)*
- [17] **Hillmann, C. (2010).** Einfluss einer Zementunterfüllung auf die marginale Qualität von Kompositfüllungen. *Med. Dissertation, Erlangen, 2010.*
- [18] **Lutz, F., Phillips, R.W. (1983).** A classification and evaluation of composite resin systems. *J Prosthet Dent* 1983;50:480-488.
- [19] **Gonçalves, F., Azevedo, C. L. N., Ferracane, J. L., & Braga, R. R. (2011).** BisGMA/TEGDMA ratio and filler content effects on shrinkage stress. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 27(6), 520–6.
- [20] **Gonçalves, F., Kawano, Y., & Braga, R. R. (2010).** Contraction stress related to composite inorganic content. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 26(7), 704–9.
- [21] **Schmidseder, J. (2009).** Farbatlant der Zahnmedizin – Ästhetische Zahnmedizin. *Georg Thieme Verlag (2. Auflage, 2009)*
- [22] **Leprince, J. G., Hadis, M., Shortall, A. C., Ferracane, J. L., Devaux, J., Leloup, G., & Palin, W. M. (2011).** Photoinitiator type and applicability of exposure reciprocity law in filled and unfilled photoactive resins. *Dental Materi-*

- als, 27(2), 157–164.
- [23] **Brandt, W. C., Schneider, L. F. J., Frollini, E., Correr-Sobrinho, L., & Sinhoreti, M. A. C. (2010).** Effect of different photo-initiators and light curing units on degree of conversion of composites. *Brazilian Oral Research*, 24(3), 263–270.
- [24] **Völkel, T. (2009).** Wissenschaftliche Dokumentation bluephase® style. *Ivoclar Vivadent AG, Forschung und Entwicklung*
- [25] **Shintani, H., Inoue, T., & Yamaki, M. (1985).** Analysis of camphorquinone in visible light-cured composite resins. *Dental Materials*, 1(4), 124–126.
- [26] **Guimarães, T., Schneider, L. F., Braga, R. R., & Pfeifer, C. S. (2014).** Mapping camphorquinone consumption, conversion and mechanical properties in methacrylates with systematically varied CQ/amine compositions. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 30(11), 1274–9.
- [27] **Frankenberger, R. (2013).** Adhäsive Zahnheilkunde. *Deutscher Zahnärzte Verlag*.
- [28] **Hadis, M. A., Shortall, A. C., & Palin, W. M. (2012).** Competitive light absorbers in photoactive dental resin-based materials. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 28(8), 831–41.
- [29] **Burtscher, P. (2013).** Ivocerin® im Vergleich zu Campherchinon. *REPORT aus der Forschung und Entwicklung der Ivoclar Vivadent AG, Nr. 19, Juli 2013*
- [30] **Park, Y. J., Chae, K. H., & Rawls, H. R. (1999).** Development of a new photo-initiation system for dental light-cure composite resins. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 15(2), 120–7.
- [31] **Moszner, N., Fischer, U. K., Ganster, B., Liska, R., & Rheinberger, V. (2008).** Benzoyl germanium derivatives as novel visible light photoinitiators for dental materials. *Dental Materials*, 24(7), 901–907.
- [32] **Ganster B, Fischer UK, Moszner N, Liska R. (2007).** New photocleavable structures. V. Bisacylgermane based photoinitiators for visible light curing. *Macromolecules 2007, submitted for publication*.
- [33] **Chen, Y. C., Ferracane, J. L., & Prahl, S. A. (2007).** Quantum yield of conversion of the photoinitiator camphorquinone. *Dental Materials*, 23(6), 655–664.
- [34] **Moszner, N., Burtscher, P., Gianasmidis, A. - Ivoclar Vivadent AG (2015).**

- Photopolymerisable and dual curing dental materials based on thiourea derivatives. *Patent-Nr. WO2015140276 A1 (Veröffentlicht am 24.09.2015)*
- [35] **Ernst, C. P., Busemann, I., Kern, T., & Willershausen, B. (2006).** Feldtest zur Lichtemissionsleistung von Polymerisationsgeräten in zahnärztlichen Praxen. *Dtsch Zahnärztl Z.* 2006 Sep;61(9):466-471.
- [36] **Krämer, N., Lohbauer, U., García-Godoy, F., & Frankenberger, R. (2008).** Light curing of resin-based composites in the LED era. *American Journal of Dentistry*, 21(3), 135–142.
- [37] **Thormann, J., Lutz, F. (1999).** Typenprüfung von Lichtpolymerisationsgeräten II: Stand 1998. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1999, 109(12):1299-323.
- [38] **Miyazaki, M., Hattori, T., Ichiishi, Y., Kondo, M., Onose, H., & Moore, B. K. (1998).** Evaluation of curing units used in private dental offices. *Operative Dentistry*, 23(2), 50–4.
- [39] **Asmussen, E., & Peutzfeldt, A. (2002).** Influence of composition on rate of polymerization contraction of light-curing resin composites. *Acta Odontologica Scandinavica*, 60(3), 146–50.
- [40] **Jandt, K. D., & Mills, R. W. (2013).** A brief history of LED photopolymerization. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 29(6), 605–17.
- [41] **Ivoclar Vivadent AG.** Lichtpolymerisation|specialfeature: Gut, wenn man die Fakten kennt.
- [42] **Feuerstein, P. (2016).** Shine on Brightly. *Dentistry today, Volume 35 (2016), Issue 6, Page 26.*
- [43] **Price, R. B. T., Labrie, D., Rueggeberg, F. A., & Felix, C. M. (2010).** Irradiance differences in the violet (405 nm) and blue (460 nm) spectral ranges among dental light-curing units. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 22(6), 363–377.
- [44] **Sommer, A. P., & Gente, M. (1999).** Light-induced control of polymerization shrinkage of dental composites by generating temporary hardness gradients. *Biomedizinische Technik. Biomedical Engineering*, 44(10), 290–3.
- [45] **Dudda, S. (2014).** Entwicklung eines neuen Applikationsverfahrens für fließfähige Komposite zur Reduktion polymerisationsbedingter Spannungen. *Med. Dis-*

sertation, Marburg 2014.

- [46] **Palin, W. M., Fleming, G. J. P., Nathwani, H., Burke, F. J. T., & Randall, R. C. (2005).** In vitro cuspal deflection and microleakage of maxillary premolars restored with novel low-shrink dental composites. *Dental Materials*, 21(4), 324–335.
- [47] **Labella, R., Lambrechts, P., Van Meerbeek, B., & Vanherle, G. (1999).** Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 15(2), 128–137.
- [48] **Ferracane, J. L. (2005).** Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dental Materials*, 21(1), 36–42.
- [49] **Braga, R. R., Ballester, R. Y., & Ferracane, J. L. (2005).** Factors involved in the development of polymerization shrinkage stress in resin-composites: a systematic review. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 21(10), 962–70.
- [50] **Davidson, C. L., & de Gee, a J. (1984).** Relaxation of polymerization contraction stresses by flow in dental composites. *Journal of Dental Research*, 63(2), 146–148.
- [51] **Rullmann, I., Schattenberg, A., Marx, M., Willershausen, B., & Ernst, C.-P. (2012).** Photoelastic determination of polymerization shrinkage stress in low-shrinkage resin composites. *Schweizer Monatsschrift Für Zahnmedizin = Revue Mensuelle Suisse D'odonto-Stomatologie = Rivista Mensile Svizzera Di Odontologia E Stomatologia / SSO*, 122(4), 294–9.
- [52] **Suliman, A. A., Boyer, D. B., & Lakes, R. S. (1993).** Interferometric Measurements of Cusp Deformation of Teeth Restored with Composites. *Dentistry, Oral Surgery & Medicine*, 72(11), 1532–1536.
- [53] **Suliman, A. A., Boyer, D. B., & Lakes, R. S. (1993).** Cusp movement in premolars resulting from composite polymerization shrinkage. *Dental Materials*, 9(1), 6–10.
- [54] **Yamazaki, P. C. V., Bedran-Russo, A. K. B., Pereira, P. N. R., & Swift, E. J. (2006).** Microleakage evaluation of a new low-shrinkage composite restorative



- material. *Operative Dentistry*, 31(6), 670–676.
- [55] **Manhart, J., Chen, H. Y., & Hickel, R. (2003).** Überlebenszeitanalyse von konservierend-zahnärztlichen Restaurationen - Teil I: Direkte Füllungen aus Komposit und Kompomer im Seitenzahnbereich. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, 112(4), 142–155.
- [56] **Alomari, Q., Ajlouni, R., & Omar, R. (2007).** Managing the polymerization shrinkage of resin composite restorations: a review. *SADJ: Journal of the South African Dental Association = Tydskrif van Die Suid-Afrikaanse Tandheelkundige Vereniging*, 62(1), 12, 14, 16 passim.
- [57] **Jedrychowski, J. R., Bleier, R. G., & Caputo, A. A. (2001).** Shrinkage stresses associated with incremental composite filling techniques in conservative Class II restorations. *ASDC Journal of Dentistry for Children*, 68(3), 161–7, 150.
- [58] **Dauvillier, B. S., Aarnts, M. P., & Feilzer, A. J. (2000).** Developments in shrinkage control of adhesive restoratives. *J Esthet Dent*, 12(6), 291–299.
- [59] **Dewaele, M., Truffier-Boutry, D., Devaux, J., & Leloup, G. (2006).** Volume contraction in photocured dental resins: The shrinkage-conversion relationship revisited. *Dental Materials*, 22(4), 359–365.
- [60] **Calheiros, F. C., Daronch, M., Rueggeberg, F. A., & Braga, R. R. (2008).** Influence of irradiant energy on degree of conversion, polymerization rate and shrinkage stress in an experimental resin composite system. *Dental Materials*, 24(9), 1164–1168.
- [61] **Davidson, C. L., de Gee, A. J., & Feilzer, A. (1984).** The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *Journal of Dental Research*, 63(12), 1396–9.
- [62] **Feilzer, A. J., De Gee, A. J., & Davidson, C. L. (1987).** Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *Journal of Dental Research*, 66(11), 1636–9.
- [63] **Lee, M. R., Cho, B. H., Son, H. H., Um, C. M., & Lee, I. B. (2007).** Influence of cavity dimension and restoration methods on the cusp deflection of premolars in composite restoration. *Dental Materials*, 23(3), 288–295.
- [64] **Park, J., Chang, J., Ferracane, J., & Lee, I. B. (2008).** How should composite be layered to reduce shrinkage stress: incremental or bulk filling? *Dental Mate-*

- rials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 24(11), 1501–5.
- [65] **Kwon, Y., Ferracane, J., & Lee, I.-B. (2012).** Effect of layering methods, composite type, and flowable liner on the polymerization shrinkage stress of light cured composites. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 28(7), 801–9.
- [66] **Segura, A., & Donly, K. J. (1993).** In vitro posterior composite polymerization recovery following hygroscopic expansion. *Journal of Oral Rehabilitation*, 20(5), 495–9.
- [67] **Nikolaenko, S. A., Lohbauer, U., Roggendorf, M., Petschelt, A., Dasch, W. & Frankenberger, R. (2004).** Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin. *Dental Materials*, 20(6), 579–585.
- [68] **Kowalczyk, P. (2009).** Influence of the shape of the layers in photo-cured dental restorations on the shrinkage stress peaks-FEM study. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 25(12), e83-91.
- [69] **Oliveira, K. M. C., Lancellotti, A. C. R. A., Ccahuana-Vásquez, R. A., & Consani, S. (2013).** Influence of filling techniques on shrinkage stress in dental composite restorations. *Journal of Dental Sciences*, 8(1), 53–60.
- [70] **Lindberg, A., van Dijken, J. W. V., & Hörstedt, P. (2005).** In vivo interfacial adaptation of class II resin composite restorations with and without a flowable resin composite liner. *Clinical Oral Investigations*, 9(2), 77–83.
- [71] **Oliveira, L. C. A., Duarte, S., Araujo, C. A., & Abrahão, A. (2010).** Effect of low-elastic modulus liner and base as stress-absorbing layer in composite resin restorations. *Dental Materials*, 26(3), 159–169.
- [72] **Chuang, S.-F., Jin, Y.-T., Liu, J.-K., Chang, C.-H., & Shieh, D.-B. (2004).** Influence of flowable composite lining thickness on Class II composite restorations. *Operative Dentistry*, 29(3), 301–8.
- [73] **Ernst, C. P., Cortain, G., Spohn, M., Rippin, G., & Willershausen, B. (2002).** Marginal integrity of different resin-based composites for posterior teeth: An in vitro dye-penetration study on eight resin-composite and compomer/adhesive combinations with a particular look at the additional use of flow-composites. *Dental Materials*, 18(4), 351–358.
- [74] **Peutzfeldt, A., & Asmussen, E. (2002).** Composite restorations: influence of

- flowable and self-curing resin composite linings on microleakage in vitro. *Operative Dentistry*, 27(6), 569–75.
- [75] **Belli, S., Inokoshi, S., Ozer, F., Pereira, P. N., Ogata, M., & Tagami, J. (2001).** The effect of additional enamel etching and a flowable composite to the interfacial integrity of Class II adhesive composite restorations. *Operative Dentistry*, 26(1), 70–5.
- [76] **Frankenberger, R., Lopes, M., Perdigão, J., Ambrose, W. W., & Rosa, B. T. (2002).** The use of flowable composites as filled adhesives. *Dental Materials*, 18(3), 227–238.
- [77] **Soh, M. S., Yap, A. U. J., & Siow, K. S. (2004).** Post-gel shrinkage with different modes of LED and halogen light curing units. *Operative Dentistry*, 29(3), 317–24.
- [78] **Mehl, A., Hickel, R., & Kunzelmann, K.-H. (1997).** Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without “softstart-polymerization.” *Journal of Dentistry*, 25(3–4), 321–330.
- [79] **Yoshikawa, T., Burrow, M. F., & Tagami, J. (2001).** A light curing method for improving marginal sealing and cavity wall adaptation of resin composite restorations. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 17(4), 359–66.
- [80] **Sakaguchi, R. L., & Berge, H. X. (1998).** Reduced light energy density decreases post-gel contraction while maintaining degree of conversion in composites. *Journal of Dentistry*, 26(8), 695–700.
- [81] **El-Korashy, D. I. (2010).** Post-gel shrinkage strain and degree of conversion of preheated resin composite cured using different regimens. *Operative Dentistry*, 35(2), 172–9.
- [82] **Amaral, C. M., Peris, A. R., Ambrosano, G. M. B., & Pimenta, L. A. F. (2004).** Microleakage and gap formation of resin composite restorations polymerized with different techniques. *American Journal of Dentistry*, 17(3), 156–60.
- [83] **Chan, D. C. N., Browning, W. D., Frazier, K. B., & Brackett, M. G. (2008).** Clinical evaluation of the soft-start (pulse-delay) polymerization technique in Class I and II composite restorations. *Operative Dentistry*, 33(3), 265–271.

- [84] **Visvanathan, A., Ilie, N., Hickel, R., & Kunzelmann, K. H. (2007).** The influence of curing times and light curing methods on the polymerization shrinkage stress of a shrinkage-optimized composite with hybrid-type prepolymer fillers. *Dental Materials*, 23(7), 777–784.
- [85] **Ernst, C.-P., Brand, N., Frommator, U., Rippin, G., & Willershausen, B. (2003).** Reduction of polymerization shrinkage stress and marginal microleakage using soft-start polymerization. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry : Official Publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et Al.]*, 15(2), 93–103; discussion 104.
- [86] **Sahafi, A., Peutzfeldt, A., & Asmussen, E. (2001).** Effect of pulse-delay curing on in vitro wall-to-wall contraction of composite in dentin cavity preparations. *American Journal of Dentistry*, 14(5), 295–6.
- [87] **Cunha, L. G., Alonso, R. C. B., Pfeifer, C. S. C., Correr-Sobrinho, L., Ferracane, J. L., & Sinhoreti, M. A. C. (2008).** Contraction stress and physical properties development of a resin-based composite irradiated using modulated curing methods at two C-factor levels. *Dental Materials*, 24(3), 392–398.
- [88] **Gao, B.-T., Lin, H., Zheng, G., Xu, Y.-X., & Yang, J.-L. (2012).** Comparison between a silorane-based composite and methacrylate-based composites: Shrinkage characteristics, thermal properties, gel point and vitrification point. *Dental Materials Journal*, 31(1), 76–85.
- [89] **Weinmann, W., Thalacker, C., & Guggenberger, R. (2005).** Siloranes in dental composites. *Dental Materials*, 21(1), 68–74.
- [90] **Mine, A., De Munck, J., Van Ende, A., Cardoso, M. V., Kuboki, T., Yoshida, Y., & Van Meerbeek, B. (2010).** TEM characterization of a silorane composite bonded to enamel/dentin. *Dental Materials*, 26(6), 524–532.
- [91] **Ghulman, M. A. (2011).** Effect of cavity configuration (C factor) on the marginal adaptation of low-shrinking composite: a comparative ex vivo study. *International Journal of Dentistry*, 2011, 159749.
- [92] **Yamasaki, L. C., De Vito Moraes, A. G., Barros, M., Lewis, S., Francci, C., Stansbury, J. W., & Pfeifer, C. S. (2013).** Polymerization development of “low-shrink” resin composites: Reaction kinetics, polymerization stress and quality of network. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Mate-*

- rials*, 29(9), e169-79.
- [93] **Roggendorf, M. J., Krämer, N., Appelt, A., Naumann, M., & Frankenberger, R. (2011).** Marginal quality of flowable 4-mm base vs. conventionally layered resin composite. *Journal of Dentistry*, 39(10), 643–7.
- [94] **Moorthy, A., Hogg, C. H., Dowling, A. H., Grufferty, B. F., Benetti, A. R., & Fleming, G. J. P. (2012).** Cuspal deflection and microleakage in premolar teeth restored with bulk-fill flowable resin-based composite base materials. *Journal of Dentistry*, 40(6), 500–5.
- [95] **Ernst, C. P. (2015).** „Schicht im Schacht“: aktuelle Betrachtung zum Thema Bulk-Fill- versus Schichttechnik bei direkten Seitenzahn-Kompositrestaurationen. *ZMK. Bd. 31. H. 11. 2015 S. 704-718*, 31.
- [96] **Alrahlah, A., Silikas, N., & Watts, D. C. (2014).** Post-cure depth of cure of bulk fill dental resin-composites. *Dental Materials*, 30(2), 149–154.
- [97] **Finan, L., Palin, W. M., Moskwa, N., McGinley, E. L., & Fleming, G. J. P. (2013).** The influence of irradiation potential on the degree of conversion and mechanical properties of two bulk-fill flowable RBC base materials. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 29(8), 906–12.
- [98] **Ilie, N., & Fleming, G. J. P. (2015).** In vitro comparison of polymerisation kinetics and the micro-mechanical properties of low and high viscosity giomers and RBC materials. *Journal of Dentistry*, 43(7), 814–22.
- [99] **Hickel, R. (2012).** Neueste Komposite – viele Behauptungen. *Bayerisches Zahnärzteblatt 2012; 11: 50-53*.
- [100] **Ilie, N., Rosentritt, M., & Lohbauer, U. (2016).** Bulk-Fill-Komposite. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, 125(10), 492–497.
- [101] **Noack, M. (2013).** Wirtschaftliche Füllungstechnik - Warum und womit? *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, 122(3), 86–94.
- [102] **Bayraktar, Y., Ercan, E., Hamidi, M. M., & Çolak, H. (2016).** One-year clinical evaluation of different types of bulk-fill composites. *Journal of Investigative and Clinical Dentistry*, (0), 1–9.
- [103] **van Dijken, J. W. V., & Pallesen, U. (2016).** Posterior bulk-filled resin composite restorations: A 5-year randomized controlled clinical study. *J Dent*, 51, 29–35.
- [104] **Manhart, J., Chen, H.-Y., & Hickel, R. (2010).** Clinical evaluation of the

- posterior composite Quixfil in class I and II cavities: 4-year follow-up of a randomized controlled trial. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 12(3), 237–43.
- [105] **van Dijken, J. W., & Pallesen, U. (2015).** Randomized 3-year clinical evaluation of Class I and II posterior resin restorations placed with a bulk-fill resin composite and a one-step self-etching adhesive. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 17(1), 81–8.
- [106] **Reiner, J. (2002).** Grundlagen der ophthalmologischen Optik. *Verlag: Books on Demand, 1. Auflage (23.04.2002)*,
- [107] **Klingler, K. (2004).** Entwicklung und erste Anwendung einer spannungsoptischen Messeinrichtung zur Beobachtung von polymerisationsschrumpfbedingten Spannungen. *Med. Dissertation, Marburg, 2004.*
- [108] **Herbert, D. (1998).** PHYSIK III: Optik, Thermodynamik, Quanten. *De Gruyter Verlag, Auflage: Reprint 2010 (03. September 1998)*
- [109] **Nötzel, M. (2008).** Untersuchungen zu dem Einfluss von Verarbeitungstechniken lichthärtender Komposite auf polymerisationsbedingte Spannungen in Modellkavitäten. *Med. Dissertation, Marburg, 2008.*
- [110] **VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland (2013).** Gebrauchsinformation x-tra base.
- [111] **Price, R. B. T., Felix, C. A., & Andreou, P. (2006).** Third-generation vs a second-generation LED curing light: effect on Knoop microhardness. *Compendium of Continuing Education in Dentistry (Jamesburg, N.J. : 1995)*, 27(9), 490–6, 518.
- [112] **Price, R. B. T., Felix, C. A., & Andreou, P. (2005).** Evaluation of a dual peak third generation LED curing light. *Compendium of Continuing Education in Dentistry (Jamesburg, N.J. : 1995)*, 26(5), 331–2, 334, 336–8 passim; quiz 348.
- [113] **Flury, S., Hayoz, S., Peutzfeldt, A., Hüsler, J., & Lussi, A. (2012).** Depth of cure of resin composites: is the ISO 4049 method suitable for bulk fill materials? *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 28(5), 521–8.
- [114] **Ernst, C. P., Meyer, G. R., Klöcker, K., & Willershausen, B. (2004).** Determination of polymerization shrinkage stress by means of a photoelastic investigation. *Dental Materials*, 20(4), 313–321.

- [115] **Pedalino, I., Hartup, G. R., & Vandewalle, K. S. (2015).** Depth of cure of bulk-fill flowable composite resins. *General Dentistry*, 63(5), e28-34.
- [116] **Baier, B. et al. (2010).** Die Aushärtungstiefe von Komposit in Abhängigkeit von der applizierten Lichtdosis. *Deutscher Zahnärztetag 2010; Posterpräsentation*.
- [117] **Stoll, R., Gente, M., Palichleb, M., & Stachniss, V. (2007).** On the effect of an internal light conductor on the marginal integrity of class-II composite fillings. *Dental Materials*, 23(2), 145–152.
- [118] **Albrecht, F. (2014).** Evaluation der adhäsiven Leistungsfähigkeit eines innovativen Schichtkonzepts. *Med. Dissertation, Erlangen 2014*.
- [119] **LEE Filters.** Datasheet LEE Filter 124 Dark Green. *LEE Filters Worldwide, Central Way, Walworth Busines Park, Andover, Hampshire, SP10 5AN, UK*
- [120] **Althaus, A. (2008).** Eine Methode zur Verlängerung der Verarbeitungszeit von lichthärtendem Komposit. *Med. Dissertation, Marburg 2008*.
- [121] **Sultan, T. (2015).** Spannungsoptische Untersuchung lichthärtender Komposite und adhäsiv eingesetzter keramischer Inlays auf polymerisationsbedingte Spannungen in Modellkavitäten. *Med. Dissertation, Marburg 2015*.
- [122] **Kinomoto, Y., & Torii, M. (1998).** Photoelastic analysis of polymerization contraction stresses in resin composite restorations. *Journal of Dentistry*, 26(2), 165–71.
- [123] **Kinomoto, Y., Torii, M., Takeshige, F., & Ebisu, S. (1999).** Comparison of polymerization contraction stresses between self- and light-curing composites. *Journal of Dentistry*, 27(5), 383–9.
- [124] **Craig, R. G., El-Ebrashi, M. K., & Peyton, F. A. (1967).** Experimental stress analysis of dental restorations. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 17(3), 292–302.
- [125] **Gonçalves, F., Pfeifer, C. C. S., Stansbury, J. W., Newman, S. M., & Braga, R. R. (2010).** Influence of matrix composition on polymerization stress development of experimental composites. *Dental Materials*, 26(7), 697–703.
- [126] **Manhart, J., & Hickel, R. (2014).** „Bulk Fill” –Komposite - Neuartige Einsatztechnik von Kompositen im Seitenzahnbereich. *Swiss Dental Journal*, 124, 19–28.
- [127] **Stoll, R., Gente, M., Palichleb, M., & Stachniss, V. (2007).** On the effect of an

internal light conductor on the marginal integrity of class-II composite fillings.  
*Dental Materials*, 23(2), 145–152.



## 10 Materialverzeichnis

- Adhese Universal (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)
- Akustisches Messsystem nach A. Althaus und M. Gente (siehe Med. Diss. Althaus, 2008)
- Aluminiumoxidpartikel der Körnungsgröße 110  $\mu\text{m}$  (Korox®, Bego GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland)
- Analysenwaage Sartorius LE 225D-0CE (Sartorius AG, Göttingen, Deutschland)
- Araldit B Platten (Fa. Tiedemann, Garmisch-Patenkirchen)
- Bonding Heliobond (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)
- Broadband Power/Energy Meter (13 PEM001) (Melles Griot, Rochester, USA)
- Deckglas-Plättchen (Fa. Kobe, Marburg)
- Diamantiertes Schleifinstrument (Busch & Co. GmbH & CO. KG, Engelskirchen, Deutschland)
- Excel und Word (Microsoft Office 2010)
- Feinstrahlgerät Renfert Basic Classic 2945-2025 (Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland)
- Halogen-Polymerisationslampe Translux CL (Heraeus Kulzer, Bad Sachsa, Deutschland)
- ImageJ Software (RSB, USA)
- LED-Polymerisationslampe Celalux 2 (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland)
- Microsoft Excel und Word für Mac (Microsoft Office für Mac 2011)
- PC Medion
- Single Tim Applikationspinsel (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland)
- Solobond M (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland)
- Spannungsoptische Messeinrichtung, nach K. Klingler, M. Nötzel und M. Gente (siehe Med. Diss. Klingler 2004 und Med. Diss. Nötzel 2008)
- Stream Catcher (Data Becker GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Deutschland)
- x-tra base Komposit (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland)

- x-tra base Komposit mit Lucirin® TPO (VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland), Testmaterial.

## **11 Verzeichnis der akademischen Lehrer**

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren:

Arweiler, Ausschill, Bette, Braun, Cetin, Czubayko, Draenert, Frankenberger, Feuser, Gente, Gloerfeld, Güldner, Hildebrandt, Höffken, Jablonski-Momeni, Kinscherf, Korbmacher-Steiner, Lill, Lotzmann, Mengel, Milani, Mittag, Moll, Mutters, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Pieper, Ramaswamy, Richter, Roggendorf, Steiniger, Teymoortash, Weber, Weihe, Westermann, Wrocklage

## 12 Danksagung

Als erstes möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. (apl.) Dr. Michael Gente für die Überlassung und gemeinsamen Erarbeitung des Dissertationsthemas danken. Eine bessere Betreuung hätte ich mir nicht vorstellen können. Es hat mir immer sehr viel Spaß und Freude bereitet, mit Ihnen zusammen zu arbeiten. Ich finde es dabei immer wieder bemerkenswert, was man in einem kurzen Gespräch mit Ihnen alles lernen und mitnehmen kann, ganz herzlichen Dank für alles!

Außerdem möchte ich meinen Eltern für die Unterstützung während des Studiums und der Dissertation danken. Mir hat es nie an irgendetwas gefehlt! Danke, dass ihr immer für uns Kinder da seid!

Des Weiteren möchte ich Herrn Feinmechanikermeister Heimann bedanken, der sehr präzise und zuverlässig die spannungsoptische Messapparatur überarbeitete und die Araldit B Plättchen fräste.

Herrn PD Dr. Roggendorf möchte ich meinen großen Dank für die Hilfe bei der statistischen Auswertung aussprechen. Danke Roggi, auch für alle anderen lehrreichen Tipps!

Der Firma VOCO danke ich für die großzügige Überlassung aller verwendeten Komposite und vor allem für das Herstellen des Komposits mit *Lucirin® TPO*.

## 13 Anhang

| Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe mit altem Bonding-Verfahren |        |       |       |                 |           |                  |
|---|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe   | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1   | 4,039  | 4,581 | 4,317 | 4,312           | 10,091    | 10,260           |
| 2   | 4,671  | 4,612 | 4,668 | 4,650           | 10,882    |                  |
| 3   | 4,663  | 4,656 | 4,620 | 4,646           | 10,873    |                  |
| 4   | 3,998  | 3,892 | 3,897 | 3,929           | 9,194     |                  |

| Bulk-Fill Technik nach Herstellerangabe mit neuem Bonding-Verfahren |        |       |       |                 |           |                  |
|---|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe   | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1   | 5,500  | 5,225 | 5,382 | 5,369           | 12,564    | 12,844           |
| 2   | 5,342  | 5,470 | 5,265 | 5,359           | 12,540    |                  |
| 3   | 5,245  | 5,234 | 5,382 | 5,287           | 12,372    |                  |
| 4   | 6,167  | 6,186 | 5,468 | 5,940           | 13,901    |                  |

| Schichttechnik Variante 1 |        |       |       |                 |           |                  |
|---------------------------|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe                     | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1                         | 3,695  | 3,055 | 3,050 | 3,267           | 7,644     | 7,518            |
| 2                         | 3,138  | 3,083 | 3,062 | 3,094           | 7,241     |                  |
| 3                         | 3,118  | 2,955 | 2,970 | 3,014           | 7,054     |                  |
| 4                         | 3,427  | 3,781 | 3,220 | 3,476           | 8,134     |                  |

| Schichttechnik Variante 2 |        |       |       |                 |           |                  |
|---------------------------|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe                     | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1                         | 2,943  | 3,000 | 2,974 | 2,972           | 6,955     | 7,679            |
| 2                         | 3,112  | 3,752 | 3,851 | 3,572           | 8,358     |                  |
| 3                         | 3,845  | 3,814 | 3,101 | 3,587           | 8,393     |                  |
| 4                         | 3,065  | 2,941 | 2,980 | 2,995           | 7,009     |                  |

| Schichttechnik Variante 3 |        |       |       |                 |           |                  |
|---------------------------|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe                     | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1                         | 3,015  | 2,950 | 2,933 | 2,966           | 6,940     | 7,269            |
| 2                         | 3,049  | 2,933 | 2,927 | 2,970           | 6,949     |                  |
| 3                         | 3,791  | 3,121 | 3,723 | 3,545           | 8,295     |                  |
| 4                         | 2,874  | 2,921 | 3,039 | 2,945           | 6,891     |                  |

| Schichttechnik Variante 1 mit neuem Bonding-Verfahren |        |       |       |                 |           |                  |
|---|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe   | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1   | 3,000  | 3,122 | 3,259 | 3,127           | 7,317     | 7,369            |
| 2   | 3,007  | 3,203 | 3,131 | 3,113           | 7,285     |                  |
| 3   | 3,236  | 3,052 | 3,222 | 3,170           | 7,418     |                  |
| 4   | 3,167  | 3,167 | 3,224 | 3,186           | 7,455     |                  |

| Bulk-Fill Technik mit violetter Vorhärtung |        |       |       |                 |           |                  |
|--|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Probe                                      | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 1  | 3,358  | 4,305 | 4,278 | 3,981           | 9,314     | 8,996            |
| 2  | 3,492  | 3,964 | 4,167 | 3,874           | 9,065     |                  |
| 3  | 4,136  | 4,154 | 4,317 | 4,202           | 9,833     |                  |
| 4  | 3,257  | 3,340 | 3,365 | 3,320           | 7,770     |                  |

| Bulk-Fill Technik mit blauer Vorhärtung |        |       |       |                 |           |                  |
|---|--------|-------|-------|-----------------|-----------|------------------|
| Anteil Lucirin TPO in Gew.-%            | rechts | unten | links | MW in Ordnungen | MW in Mpa | Gesamt-MW in Mpa |
| 10                                      | 3,510  | 3,410 | 4,417 | 3,779           | 8,843     | 7,840            |
| 12                                      | 3,410  | 3,088 | 3,385 | 3,294           | 7,709     |                  |
| 14                                      | 3,205  | 3,137 | 3,315 | 3,219           | 7,532     |                  |
| 16                                      | 3,286  | 3,306 | 3,298 | 3,297           | 7,714     |                  |
| 18                                      | 3,361  | 3,205 | 3,319 | 3,295           | 7,711     |                  |
| 20                                      | 3,198  | 3,353 | 3,292 | 3,281           | 7,677     |                  |
| 22                                      | 3,414  | 3,188 | 3,259 | 3,287           | 7,691     |                  |

| Direktes Kompositinlay mit Ausgleichsschicht                             |  |        |       |       |                         |                 |                      |
|--|--|--------|-------|-------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| Anteil x-tra<br>base mit CQ<br>an<br>Ausgleichs-<br>schicht<br>in Gew.-% | Vorhärtung<br>der<br>Ausgleichs-<br>schicht in s | rechts | unten | links | MW in<br>Ord-<br>nungen | MW<br>in<br>Mpa | Gesamt-<br>MW in Mpa |
| 3  | 20   | 1,247  | 2,031 | 2,056 | 1,778                   | 4,161           | 5,237                |
| 3  | 10   | 1,971  | 2,065 | 1,984 | 2,007                   | 4,695           |                      |
| 4  | 20   | 3,167  | 3,156 | 2,167 | 2,830                   | 6,621           |                      |
| 4  | 10   | 2,173  | 2,093 | 1,970 | 2,079                   | 4,864           |                      |
| 5  | 20   | 2,086  | 2,206 | 2,137 | 2,143                   | 5,015           |                      |
| 5  | 10   | 2,078  | 2,931 | 2,171 | 2,393                   | 5,600           |                      |
| 6  | 20   | 2,234  | 3,067 | 2,081 | 2,461                   | 5,758           |                      |
| 6  | 10   | 2,070  | 2,154 | 2,079 | 2,101                   | 4,916           |                      |
| 7  | 20   | 2,147  | 2,063 | 2,003 | 2,071                   | 4,846           |                      |
| 7  | 10   | 1,981  | 2,167 | 2,060 | 2,069                   | 4,842           |                      |
| 8  | 20   | 2,063  | 2,200 | 3,128 | 2,463                   | 5,764           |                      |
| 8  | 10   | 2,163  | 2,192 | 3,030 | 2,462                   | 5,760           |                      |

| Schichttechnik mit Vorhärtung |        |       |       |                    |           |
|-------------------------------|--------|-------|-------|--------------------|-----------|
| Probe                         | rechts | unten | links | MW in<br>Ordnungen | MW in Mpa |
| 1                             | 2,190  | 3,088 | 3,218 | 2,832              | 6,627     |